

Sannamari Pykäläinen

ILMASTOINNIN  
PÄÄTELAITTEIDEN  
ÄÄNITEKNISET OMINAISUUDET  
Fläkt Woods Oy

Opinnäytetyö  
Talotekniikan koulutusohjelma


Huhtikuu 2012




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

# KUVAILULEHTI

		<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  7.5.2012
<b>Tekijä(t)</b> Sannamari Pykäläinen		<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Talotekniikan (LVI) koulutusohjelma
<b>Nimeke</b> Ilmastoinnin päätelaitteiden äänitekniset ominaisuudet		
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Fläkt Woods Oy:n valikoimassa olevien tulo- ja poistoilmasäleikköjen äänitekniisiä ominaisuuksia. Kyseisten säleikköjen äänenkehitykseen ja -vaimennukseen vaikuttaa sekä itse säleikkö että siihen kuuluva tasauslaatikko. Näiden lisäksi tasauslaatikoiden eri liitännätavat vaikuttavat myös tuotteen ääniominaisuuksiin. Aikaisemmin näiden päätelaitteiden äänitiedot on ilmoitettu tuote-esitteissä pelkän tasauslaatikon äänitietojen perusteella, jolloin se antaa hieman virheellisen kuvan tuotteen ääniominaisuuksista. Tämän tutkimuksen lisäksi oli tavoitteena muodostaa laskentamalli, jonka avulla voitaisiin laskea kyseisten tuotteiden äänenkehitys sekä -vaimennus.</p> <p>Tutkimusmenetelmänä käytettiin äänitekniisiä mittauksia, jotka suoritettiin Fläkt Woods Oy:n laboratoriotiloissa Toijalassa. Kyseiset mittaukset tehtiin neljälle eri säleikölle sekä niihin kuuluville tasauslaatikoille käyttäen useaa eri säleikkökokoja. Näiden mittausten perusteella voitiin analysoida säleikköjen sekä tasauslaatikoiden liitännätapojen vaikutusta tuotteen äänitasoon ja vaimennuskykyyn sekä yleistää laskentamalli käytettäväksi jokaiselle tutkittavalle tuotteelle. Tuotteita, jotka mitattiin jokaisella liitännätavalla, oli neljää eri säleikkökokoja. Näillä tuotteilla testattiin myös laskentamallin toimivuutta tutkimuksen lopussa.</p> <p>Mittaustulokset olivat yleisesti ottaen hyvin onnistuneita, ja myös laskentamallin toteutus osoittautui päätelaitteiden äänenkehityksen osalta onnistuneeksi, ja sitä voitaisiin jatkossa käyttää kyseisten tuotteiden äänitasokäyrien laskemiseen. Laskennallisissa äänenvaimennusarvoissa sen sijaan oli yleisesti ottaen hieman eroavaisuutta mitattuihin arvoihin, jolloin laskentamallia voitaisiin vielä kehittää tarkemmaksi. Molempien laskentamallien tuloksia tarkasteltaessa voitiin huomata, että laskennalliset arvot poikkesivat eniten mitatuista arvoista käyttäen tasauslaatikon B-liitännätapaa. Lisäksi äänitasomittauksissa osalla tuotteista esiintyi niiden painekäyrissä hieman päällekkäisyyttä pienimmillä säätöasennoilla. Tämä todennäköisesti johtui siitä, että säätölaitteen avausasento olikin täysin kiinni kaikilla pienimmillä säätöasennoilla ja alkoi avautua vasta suuremmilla säätöasennoilla. Mikäli laskentamallia päätettäisiin kehittää vielä eteenpäin, tulisi nämä edellä mainitut seikat ottaa tutkimuksessa huomioon.</p>		
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  ilmastointi, ilmanvaihto, äänitekniikka, mittaus, ääni, vaimennus		
<b>Sivumäärä</b>  48+13	<b>Kieli</b>  suomi	<b>URN</b>
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>		
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b>  Heikki Salomaa		<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b>  Fläkt Woods Oy

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  7.5.2012	
<b>Author(s)</b> Sannamari Pykäläinen		<b>Degree programme and option</b> Building services (HVAC)	
<b>Name of the bachelor's thesis</b> Acoustic characteristics of air terminal devices			
<b>Abstract</b>  <p>The product range of Fläkt Woods Ltd includes a large number of grilles of supply and exhaust air. The aim of this thesis was to study acoustic characteristics of these devices. Both the grille and its connection box affect the sound level and attenuation of the product. Earlier sound features of these air terminal devices have been given only on the basis of the connection box. Therefore, it gives a slightly false impression of its acoustic characteristics. In addition to this study the aim was also to develop a calculation model, which can be used for calculation of sound features of the products.</p> <p>As a research method was used for acoustic measurements, which were performed in acoustic laboratory of Fläkt Woods in Toijala. The measurements were done with four grilles and those connection boxes using a variety of connection methods. Based on the results of the measurements it could be analyzed how the grilles and the connection methods affect the sound level and attenuation. Also the calculation model could be generalized to be used for each product. There were four different sizes of grilles, which were measured by using every connection method. These products were also tested in the performance of the calculation model.</p> <p>The measurements were generally very successful. Also the calculation model for sound level came to be successful, and it could be used for calculating the sound levels of the products. However, there was little difference between the calculations and measurements of attenuation values. As a result the calculation model for attenuation could still be developed more accurate. When reviewing both of the results, it could be noted that the biggest difference was when using connection method B. In addition, in the measurements of the sound level there was little overlap also with pressure curves of the products between the lowest setting positions. That was probably because the adjusting device was completely closed when doing measurements with the smallest setting positions and started to open only at a bigger position. These are factors that should be taken into account if decided to develop the calculation model more accurate.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  air conditioning, ventilation, measurement, sound, attenuation			
<b>Pages</b> 48+13		<b>Language</b> finnish	
<b>URN</b>			
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>  Heikki Salomaa		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  Fläkt Woods Ltd	

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	ILMASTOINNIN ÄÄNITEKNIikka.....	2
2.1	Äänen perusteet .....	2
2.2	Huoneakustiikka .....	4
2.3	Ilmastointilaitoksen äänilähteet .....	5
2.3.1	Puhaltimen ääni.....	6
2.3.2	Virtausääni .....	7
2.3.3	Päätelaitteiden ääni .....	8
2.4	Äänen eteneminen .....	8
2.5	Äänen vaimeneminen .....	9
2.6	Määräykset ja ohjeet .....	10
3	KAIUNTAHUONEMENETELMÄ .....	12
3.1	Yleistä kaiuntahuonemenetelmästä .....	12
3.2	Standardit.....	12
3.3	Fläkt Woods Oy:n kaiuntahuone .....	13
4	MITTAUKSIEN TOTEUTUS.....	14
4.1	Mitatut tuotteet.....	14
4.2	Mittausjärjestelyt .....	17
4.2.1	Äänenkehitysmittaus.....	18
4.2.2	Vaimennusmittaus.....	22
5	TULOKSET SEKÄ NIIDEN ANALYSOINTI.....	25
5.1	Äänitasomittaus .....	26
5.1.1	Tulosten käsittely .....	26
5.1.2	Laskentamallin kehittäminen .....	30
5.1.3	Laskentamallin onnistuminen .....	34
5.2	Vaimennusmittaus .....	38
5.2.1	Tulosten käsittely .....	38
5.2.2	Laskentamallin kehittäminen .....	39
5.2.3	Laskentamallin onnistuminen .....	42
6	POHDINTA .....	45

## LIITTEET

- 1 Mitattavat tuotteet
- 2 Esimerkki päätelaitteen mittauspöytäkirjasta
- 3 Äänenkehityksen laskentamallin tulokset
- 4 Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset
- 5 Korjaustermit

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni toimeksiantajana on Fläkt Woods Oy, joka on Suomen johtava ilmastointilaitteisiin erikoistunut yritys. Yrityksen toimialueeseen kuuluu sekä asuinrakennusten että teollisuuden ilmanvaihtoratkaisut aina ilmankäsittelykoneista erilaisiin kanavatuotteisiin sekä päätelaitteisiin.

Fläkt Woods Oy toimii neljällä eri paikkakunnalla: Turussa, Kihniössä, Espoossa sekä Toijalassa. Turun ja Kihniön toimipisteissä valmistetaan ilmastointikanavia, ja tämän lisäksi Turussa tuotetaan myös ilmastointipuhaltimia asuinrakennusten tarpeisiin. Espoossa sen sijaan valmistetaan teollisuuteen tarkoitettuja puhaltimia, ja Toijalassa ilmastoinnin päätelaitteita. Toijalan toimipisteessä sijaitsee myös äänilaboratorio, jossa on käytettävissä standardien mukainen kaiuntahuone tuotteiden äänitekniisiä mittauksia varten. Myös tähän tutkimukseen sisältyvät mittaukset suoritettiin kyseisissä tiloissa.

Fläkt Woods Oy:n tuotevalikoimaan kuuluu useita eri tulo- ja poistoilmasäleikköjä sekä niihin kuuluvia tasauslaatikoita. Näiden säleikköjen äänitasoon sekä vaimennuskykyyn vaikuttaa sekä itse säleikkö että tasauslaatikko. Aikaisemmin säleikköjen ääniominaisuudet on ilmoitettu valintaohjelmissa ja tuote-esitteissä pelkän tasauslaatikon perusteella, jolloin tämä antaa hieman virheellisen kuvan tuotteen ääniominaisuuksista, sillä todellisuudessa myös säleikkö vaikuttaa tuotteen äänenkehitykseen ja -vaimennukseen. Lisäksi tasauslaatikoissa olevat eri liitännät vaikuttavat myös edellä mainittuihin ominaisuuksiin.

Opinnäytetyön tarkoituksena on siis tutkia tulo- ja poistoilmasäleikköjen sekä niihin kuuluvien tasauslaatikoiden äänitekniisiä ominaisuuksia ja selvittää, miten säleikkö ja tasauslaatikoiden eri liitännät vaikuttavat päätelaitteen äänenkehitykseen ja -vaimennukseen. Näitä äänitekniisiä ominaisuuksia tutkimalla on tarkoituksena muodostaa laskentamalli kyseisten säleikköjen ja tasauslaatikoiden eri yhdistelmien äänenkehityksen ja -vaimennuksen laskemiseksi. Tavoitteena siis olisi, että sekä äänenkehitys- että vaimennusmittaukset voitaisiin jatkossa suorittaa ainoastaan pelkille tasauslaatikoille säleikkökokoa kohden käyttäen vain yhtä liitännätapaa. Laskentamallin avulla saataisiin sitten muodostettua äänikäyrästöt ja vaimennusarvot lopuille liitännätavoille sekä säleikkö-laatikko -yhdistelmille.

## 2 ILMASTOINNIN ÄÄNITEKNIikka

### 2.1 Äänen perusteet

Äänellä tarkoitetaan kimmoisessa väliaineessa, useimmiten ilmassa, etenevää värähtelyä eli aaltoliikettä. Esimerkiksi ihmisen äänihuulet saavat ympäristössään aikaan ilman tihentymiä sekä harventumia, jolloin ihminen aistii kyseiset ilmanpaineen vaihtelut äänenä. Tällöin värähtelyn taajuuden  $f$  on oltava vähintään noin 20 Hz ja enintään noin 20 000 Hz. Äänet, joita ihminen ei kuuloaistin avulla pysty havaitsemaan ovat infraääni sekä ultraääni. Infraäänin taajuus on alle 20 Hz, ja sitä syntyy esimerkiksi maanjäristyksissä. Ultraääntä sen sijaan käytetään muun muassa lääketieteessä sekä kaikuluotauksessa, ja sen taajuus on yli 20 kHz. Taajuudella siis tarkoitetaan jaksojen lukumäärää sekunnissa  $s$ , eli sen yksikkö Hertsi on

$$Hz = \frac{1}{s}, \quad (1)$$

jossa  $s$  on sekunti. /1, s. 5; 2, s. 35./

Äänilähteiden tuottamat äänenpainetasot voivat olla hyvinkin erilaisia yksittäisillä taajuuksilla. Tämän vuoksi äänen taajuusjakauma jaetaan pienempiin osiin eli taajuuskaistoihin. Tavallisesti akustiikassa käytetään ns. oktaavikaistoja sekä terssi- eli kolmannesoktaavikaistoja. Äänimittareiden oktaavikaistat standardikäytössä ovat 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 ja 16000 Hz. Alimmilla ja korkeimmilla kaistoilla ei kuitenkaan yleensä ole käytännöllistä merkitystä, joten tarkasteltava alue rajataankin yleensä esimerkiksi kaistoihin 63 ... 8000 Hz. /1, s. 5; 2, s. 37./

Kaasuissa ja nesteissä ääni on pitkästä aaltoliikettä, joka kimmoisessa väliaineessa siirtyy eteenpäin. Äänen nopeus on vakio ja sama kaikilla taajuuksilla tasa-aineisessa kaasussa. Ilmassa äänen nopeus  $c$  on noin 340 m/s, joka juontaa kaavasta 2, kun ilman lämpötilan  $t$  (°C) arvona käytetään noin 14 °C.

$$c = 331,4 + 0,607t \quad (2)$$

Pitkittäisessä aaltoliikkeessä samanvaiheisten peräkkäisten aaltorintamien välistä etäisyyttä sanotaan aallonpituudeksi, joka on määritetty yhtälössä 3. Esimerkkinä tästä,

kun äänen nopeus on noin 340 m/s ilmassa ja ihmisen havaitsema taajuusalue on 16...16 000 Hz, aallonpituusalue on noin 20 m...20 mm.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$\lambda$	aallonpituus, m
$c$	äänen nopeus ilmassa (340 m/s)
$f$	taajuus, Hz

Äänen voimakkuutta voidaan tarkastella kolmella eri tavalla; äänen intensiteettitaso, painetason sekä tehotason avulla. Äänen intensiteetillä  $I$  tarkoitetaan äänen tehotiheyttä kuvitellulla tai todellisella pinnalla. Yhtälössä 4 oleva vertailuarvo  $I_0$  on valittu ihmisen kuulokynnyksen intensiteetin mukaan. Äänen painetaso  $L_p$  kuvaa äänen paineen voimakkuutta. Ihminen pystyy aistimaan paineen vaihtelut 20:sta  $\mu\text{Pa}$  ylöspäin. Tätä arvoa käytetään myös painetason vertailuarvona  $p_0$ . Äänen tehotasolla  $L_w$  sen sijaan tarkoitetaan laitteiden, esimerkiksi puhaltimien ja pumppujen, tuottamaa ääntä, eikä se ole riippuvainen etäisyydestä tai ympäristön ominaisuuksista. Nämä suureet lasketaan kymmenkantaisen logaritmin avulla, jossa arvot ilmoitetaan desibeleissä (dB). Alle on koottu kyseisten suureiden laskentayhtälöt.

### Äänen intensiteettitaso

$$L_i = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (4)$$

$I$	äänen intensiteetti, $\text{W}/\text{m}^2$
$I_0$	vertailuarvo, $1 \text{ pW}/\text{m}^2 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$

### Äänen painetaso

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (5)$$

$p$	äänen paine, Pa
$p_0$	vertailuarvo, $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

### Äänen tehotaso

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (6)$$

$W$	ääniteho, W
$W_0$	vertailuarvo, $1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$



Ilmanvaihtolaitoksen äänitasoa mitattaessa käytetään ns. taajuuspainotusta, joka helpottaa taajuusanalyysin tekemistä varsinkin silloin, kun mitattava ääni on joko hyvin lyhytkestoinen tai voimakkuudeltaan vaihteleva. Äänitasomittareihin on rakennettu ns. painotussuodattimia, jotka pyrkivät matkimaan ihmiskorvaa painottaen taajuuksia, jotka korva kuulee hyvin ja suodattaen pois niitä, joilla ei kyseisessä mittauksessa ole suurta merkitystä. Standardin mukaisia painotuksia on kolme; A, B ja C. A-taajuuspainotusta käytetään hiljaisilla äänillä (<55 dB), B-painotusta keskivoimaisilla (55...85 dB) ja C-painotusta tätä voimakkaammilla äänillä (>85 dB). /1, s. 13./

Ihmiskuulo on herkimmillään taajuusalueella 2000 - 5000 Hz, ja tämän alueen ulkopuolella kuulon herkkyys alenee. A-painotuksella voidaan kyseinen kuuloaistin herkkyys ottaa huomioon. Myös äänen voimakkuus vaikuttaa kuulon herkkyyteen. Jotta tämä voitaisiin ottaa huomioon, on olemassa myös muita painotuksia. Niistä käytetyin on edellä mainittu C-painotus. /2, s. 39./ Ilmanvaihtolaitoksissa sallitut äänitasot ovat yleensä hyvinkin alhaisia, jolloin ne ilmoitetaan lähes aina A-painotettuina äänenpainetasoina ja merkitään dB(A) /1, s. 13/.

## 2.2 Huoneakustiikka

Ilmastoinnin äänitekniikassa huoneakustiikalla tarkoitetaan äänilähteestä aiheutuvan tehotason aiheuttamaa painetasoa huoneessa. Tähän vaikuttaa muun muassa äänilähteen voimakkuus, huoneen tilavuus ja sen pintojen absorptio sekä äänilähteen ja havaintopisteen etäisyys ja sijainti. Äänilähteen havaintopiste sijoitetaan yleensä 1,5 m korkeudelle lattiasta. Äänen painetaso havaintopisteessä saadaan laskettua yhtälöstä 7. Mikäli huoneessa on useita äänilähteitä, havaintopisteen painetaso saadaan laskemalla yhteen jokaisen äänilähteen erikseen aiheuttamat painetasot kyseisessä pisteessä.

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{1}{Qr^2} + \frac{4}{A} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

$L_p$	äänen painetaso havaintopisteessä, dB
$L_w$	äänilähteen tehotaso, dB
$Q$	avaruuskulma (taulukko 1)
$r$	äänilähteen ja havaintopisteen etäisyys, m
$A$	huoneen kokonaisabsorptioala, m <sup>2</sup>

**TAULUKKO 1. Suuntakertoimet äänilähteen sijainnista riippuvana /1, s. 17/**

<i>Äänilähteen sijainti huoneessa</i>	<i>Q</i>
<i>Vapaasti tilassa</i>	$4\pi$
<i>Tasopinnalla etäällä sen reunoista (seinällä, katossa)</i>	$2\pi$
<i>Kulmassa kahden kohtisuoran tason leikkausviivalla</i>	$\pi$
<i>Nurkassa kolmen kohtisuoran tason leikkauspisteessä</i>	$\pi/2$

Edelliseen yhtälöön liittyen äänen absorptiolla tarkoitetaan esimerkiksi huoneen pintaan osuneen äänen energian imeytymistä materiaaliin. Absorption tehokkuus määritetään absorptiokertoimen avulla, joka saadaan yhtälöstä 8.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_o} \quad (8)$$

$\alpha$  pinnan absorptiokerroin

$I_a$  pintaan imeytyneen äänen intensiteetti, W/m<sup>2</sup>

$I_o$  pintaan osuneen äänen intensiteetti, W/m<sup>2</sup>

Tämän jälkeen voidaan määrittää huoneen kokonaisabsorptioala, joka saadaan laskettua kaavan 9 avulla. Tässä yhtälössä otetaan huomioon myös huoneessa olevat kalusteet, laitteet sekä henkilöt. Sekä näille että erilaisille pintamateriaaleille on määritetty absorptioalat sekä -kertoimet niiden laskentaoppaissa

$$A = \sum \alpha S, \quad (9)$$

$A$  huoneen kokonaisabsorptioala, m<sup>2</sup>

$\alpha$  osapinnan absorptiokerroin

$S$  osapinnan pinta-ala, m<sup>2</sup>

### 2.3 Ilmastointilaitoksen äänilähteet

Jotta hyvän sisäilmaston kriteerit täyttyvät, on rakennuksessa olevien tilojen äänitason oltava miellyttävä ja tasainen yhdessä lämpötilan ja ilmannopeuden kanssa. Ilmastointi on yksi merkittävimmistä rakennuksen äänilähteistä. Se sekä synnyttää ääntä että kuljettaa sitä muihin tiloihin rakennuksessa. Ilmastointilaitoksessa olevat äänilähteet

aiheuttavat meluhaittoja rakennuksen sisällä, jolloin ne voivat vaikuttaa muun muassa yleiseen viihtyvyyteen, terveyteen sekä työtehokkuuteen. Jotta häiritsevät äänet saataisiin vaimennettua tai niiden siirtyminen huonetiloihin voitaisiin estää, on edellytyksenä huolellinen ja ammattitaitoinen äänitekninen suunnittelu sekä siihen kuuluvat tarkat laskelmat. /1, s. 1-3; 3, s. 53./

Suurimpia äänilähteitä puhaltimien ja ilmapuhaltimien lisäksi ovat kanavistossa olevat pellit sekä päätelaitteet. Myös kanavissa, säätölaitteissa ja päätelaitteissa virtaava ilma aiheuttaa ääntä, joka kulkeutuu helposti huonetiloihin. /1, s. 41; 3, s. 53./ Seuraavassa on käsitelty pääosin puhaltimesta, ilmavirtauksesta sekä päätelaitteesta syntyvää ääntä.

### **2.3.1 Puhaltimen ääni**

Puhallin on ilmanvaihtolaitoksen merkittävin äänilähde. Ensisijaisesti on hyvin tärkeää, että puhaltimen äänitehotasot tunnetaan ja laitevalmistajien äänitiedot ovat luotettavia. Merkittävintä on kuitenkin tietää puhaltimen äänitehotaso paine- ja imukanaviin, sillä niitä kautta kyseinen ääni kulkeutuu eteenpäin rakennuksessa. Tämä voidaan mitata muun muassa kaiuntahuonemenetelmällä, jossa puhallin toimii kaiuntahuoneen ulkopuolella ja ääni kulkeutuu melko lyhyen kanavan kautta huoneeseen. Tärkeää on, että kanava rakennetaan siten, että siinä tapahtuva äänen vaimeneminen on mahdollisimman pieni. /1, s. 45–46./ Kaiuntahuonemenetelmästä kerrotaan tarkemmin luvussa 3.

Puhaltimen pyörimisnopeutta muuttamalla saadaan vaihdettua ilman tilavuusvirtaa sekä kokonaispainetta. Puhaltimen suoritusarvojen muuttuessa muuttuu myös äänitehotaso, jolloin mittaukset on suoritettava riittävän monissa puhaltimen toimintapisteissä. Mittaustulosten perusteella puhaltimelle saadaan sen ominaiskäyrästä, josta voidaan lukea puhaltimen kokonaisäänitehotaso kaikissa toimintapisteissä. Tämä helpottaa suunnittelijoita valitsemaan oikeanlainen puhallin kyseiseen järjestelmään. /1, s. 46./

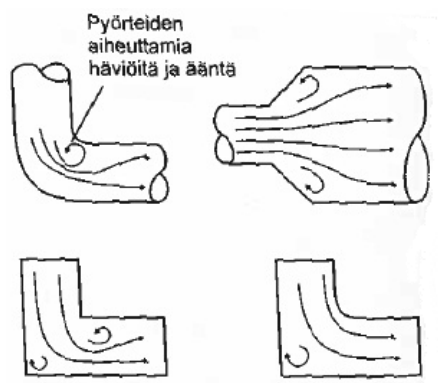
Puhaltimen synnyttämään äänitehoon vaikuttaa muun muassa puhaltimen asennustapa, jonka tulisi olla virtausteknisesti edullinen, sillä imu- ja painepuolelle siirtyvät äänitehot ovat yleensä erisuuruiset. Muita seikkoja, jotka vaikuttavat puhaltimen ääneen,

ovat puhaltimen moottorista, pyörivien osien epätasapainosta ja turbulenttisesta ilmapirtauksesta syntyvä ääni. /1, s. 46–48./ Tähän liittyen voidaan sanoa, että puhaltimen aiheuttama ääni ja sen energiatehokkuus kulkevat yleensä käsi kädessä; mitä energiatehokkaampi laite on, sitä vähemmän se tuottaa ääntä. Myös puhaltimen iällä ja kunnolla on merkitystä sen äänenkehitykseen.

### 2.3.2 Virtausääni

Ilmavirtaus kanavistossa on yleensä aina pyörteistä, jolloin se aiheuttaa ääntä. Myös ilmavirran nopeuden muuttuminen, mutkat ja haarat kanavistossa, kanavan muodon tai koon muutokset sekä erilaiset säätölaitteet ja venttiilit vaikuttavat virtausäänen syntymiseen. Suurimmat virtausnopeudet ja samalla suurimmat äänitehot kanavistossa syntyvät säätölaitteista ja niistä aiheutuvista painehäviöistä. Tämän vuoksi kanaviston ääniteknisen suunnittelun keskeisenä perustana on painehäviöiden oikeanlainen mitoitus. /1, s. 52–53./

Kuvassa 1 on esitetty, miten ilmavirtaus käyttäytyy erilaisissa kanavaosissa. Siitä voidaan todeta, että osa ilmavirrasta kulkeutuu laminaarisesti, mutta osa jää pyörteilemään paikoilleen tai pyrkii kääntymään takaisin, jolloin tapahtuu paineen vaihtelua ja täten synnyttää ääntä.



**KUVA 1. Ilmavirtauksen pyörteily /1, s. 52/**

Jotta virtausmelu saadaan pidettyä sallituissa rajoissa, on käytettävä riittävän alhaisia ilmavirran nopeuksia. Tämä ei kuitenkaan aina ole täysin mahdollista esimerkiksi tilan puutteen vuoksi. Ilmavirran nopeuden ollessa alhainen se lisää monesti myös kanaviston hankintakustannuksia. Muita seikkoja, joilla virtausmelua saadaan minimoitua,

ovat jyrkkien poikkeipinnan ja suunnan muutoksien välttäminen sekä äänenvaimentimen sijoittaminen ääntä kehittävän osan ja päätelaitteen välille.

### 2.3.3 Päätelaitteiden ääni

Päätelaitteiden rajoittaessa ilmavirtausta, jolloin myös painehäviö kasvaa, ne aiheuttavat ääntä. Päätelaitteen kehittämä ääni kulkeutuu suoraan huonetilaan, jolloin sitä ei voida enää vaimentaa. Tämän vuoksi päätelaitteet on valittava siten, että ne eivät aiheuta äänenpainetasoa, joka ylittää sallitut arvot. Päätelaitteen tehotasoon vaikuttaa myös sen liitântätapa kanavaan, jonka vuoksi virtauksen tulisi olla tasainen kyseisessä liitoskanavassa. Virheellinen asennuspa voi lisätä päätelaitteen äänitasoa jopa 10...20 dB.

Päätelaitteen yhteyteen asennettu kuristuspelti, joka lisää painehäviön kasvua, vaikuttaa myös laitteen äänenkehitykseen. Akustisesti vaativissa tiloissa, kuten konserttisaleissa, ei päätelaitteen yhteyteen saa sijoittaa kuristuselimiä. Näissä tapauksissa ne sijoitetaan liitoskanavaan etäisyydelle 5...10 kertaa kanavan halkaisija. Lisäksi kuristuselimen ja tuloilmalaitteen välinen kanava varustetaan äänenvaimennusverhouksella tai tämän jälkeen voi olla myös erillinen äänenvaimennin.

Päätelaitteiden äänitehotaso mitataan kaiuntahuonemenetelmää käyttäen eri tilavuusvirroilla, painehäviöillä ja venttiilin avausasennoilla, jotta tuotteesta saataisiin koko toiminta-aluetta edustava kuva. Mittaustulos annetaan A-taajuuspainotettuna äänenpainetasona diffuusissa äänikentässä normaalihuoneessa, jonka huoneabsorptio on  $10 \text{ m}^2$ . Huoneeseen tullessa useampia päätelaitteita äänitaso kohoaa. Tällöin äänitason lisäys on  $10 \lg \cdot n$ , jossa  $n$  on laitteiden lukumäärä. /1, s. 54./

## 2.4 Äänen eteneminen

Ilmastointilaitoksessa syntyvät äänet siirtyvät rakennuksessa monia eri reittejä ja eri tavoin vaimentuen. Näitä ovat muun muassa kanavien ilmatilaa pitkin huoneeseen tai huonetilasta toiseen, kanavien seinämien läpi tai niitä pitkin, rakennuksen seinä- tai välipohjarakenteiden lävitse sekä runkoääninä koneista rakennukseen. On siis hyvin tärkeää, että kaikki nämä reitit huomioidaan ilmastoinnin ääniteknisessä suunnittelussa. /1, s. 64./

Ääneneristyksellä tarkoitetaan seinämän kykyä estää ilmaäänien kulkeutuminen lävitseen. Tätä kuvataan suureella, jota kutsutaan akustiseksi heikennykseksi  $R$ . Esimerkiksi äänen kulkeutuessa kanavan seinämän lävitse tai sitä pitkin, voidaan melun eteneminen estää lisäämällä kanavan seinämän akustista heikennystä. Myös seinä- ja välipohjarakenteiden akustista heikennystä parantamalla tai ääntä aiheuttavien kojeiden koteloinnilla voidaan alentaa huoneen painetasoa.

## 2.5 Äänen vaimeneminen

Ääni vaimenee kanavistossa sen kulkiessa eteenpäin. Erilaiset kanavat vaimentavat ääntä eri tavalla. Suorissa pyöreissä peltikanavissa ja sileissä betonikanavissa äänen vaimeneminen on hyvin vähäistä, vain  $0,03 \dots 0,3$  dB/m, kun taas peltiset suorakaidekanavat vaimentavat ääntä tehokkaammin. Vaimennustarpeen ollessa esimerkiksi 30 dB tarvitaan sen saavuttamiseksi jopa satoja metrejä kanavapituutta. Monesti kanavan vaimennus jätetään huomioimatta suunnittelussa. /1, s. 65./

Sen sijaan suorakaidekanavasta ääni siirtyy helpommin seinämän läpi pois kanavasta, tai jos kanava on päällystetty mineraalivillalla sekä suojattu pellillä, se vaimentaa tehokkaasti matalia ääniä. Tästä johtuen suorakaidekanavien vaimennus otetaan huomioon, sillä matalien äänten vaimentaminen on muutenkin hyvin hankalaa. /1, s. 65./

Myös edellä mainitut äänilähteet edellyttävät ääntä vaimentavia toimenpiteitä; esimerkiksi äänenvaimentimien asentamista puhaltimien sekä peltien lähelle, jotta ääni ei pääsisi kantautumaan kanavan eikä myöskään rakenteiden kautta muualle rakennukseen. Muita ääntä vaimentavia tekijöitä ovat muun muassa kanavan sisäpuoliset absorptioverhoukset sekä kanavistossa olevat haarat ja mutkat /1, s. 66–68/. Myös päätevaimennus ja huonevaimennus otetaan huomioon laskelmissa. Seuraavassa kappaleessa käsitellään tarkemmin päätevaimennusta, joka on oleellinen osa tätä opinnäytetyötä.

**Päätevaimennus** syntyy, kun huonetilaan päättyvän kanavan päästä osa äänestä heijastuu takaisin. Vaimennuksen määrään vaikuttaa kanavan poikkipinta-ala, äänen taajuus sekä päätekohdan sijainti tilan rajapintoihin nähden. /1, s. 83./ Kyseinen vaimennus saadaan laskettua kaavasta 10.

$$D = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{c}{4f\pi} \right)^2 \frac{Q}{S} \right] \quad (10)$$

$D$	päätevaimennus, dB
$c$	äänen nopeus ilmassa, m/s
$f$	taajuus, Hz
$Q$	aukon sijainti huoneessa = avaruuskulma (taulukko 1)
$S$	pääteaukon ala, m <sup>2</sup>

Päätevaimennus on voimakkainta matalilla äänillä ja pienikokoisilla kanavan pääteaukoilla. Kyseinen vaimennus syntyy täysin avoimella pääteaukolla, mutta yleensä aukossa on päätelaite, joka myös lisää vaimennusta. /1, s. 83–84./

Päätelaitteen äänenvaimennus mitataan siten, että kanavaan aiheutetaan ääni, jonka jälkeen äänenpainetasot mitataan oktaavikaistoin sekä avoimella kanavan päällä että päätelaitteen ollessa asennettuna paikoilleen. Kyseisten painetasojen erotus on päätelaitteen tuottama lisävaimennus. Kyseisessä mittauksessa on hyvin tärkeää, että äänilähde lähettää kummassakin mittauksessa samanlaista ja samantasoista ääntä. Monesti päätelaitteiden valmistajat ilmoittavat kyseisen vaimennuksen siten, että niissä on otettu jo huomioon vapaan kanava-aukon päätevaimennus. /1, s. 83–84./

## 2.6 Määräykset ja ohjeet

Rakennuksen ilmastointilaitokselle on asetettu erilaisia äänitekniisiä vaatimuksia ja tavoitteita, joita tulee noudattaa saavuttaakseen rakennuksessa viihtyisät ääniolosuhteet. Määräykset annetaan usein esimerkiksi rakennus- ja meluntorjuntalain perusteella, mutta myös terveydensuojelulakia voidaan soveltaa joissakin tapauksissa /1, s. 31/.

Ympäristöministeriön julkaisema Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1 sisältää äänitasoa koskevia vaatimuksia rakennusten teknisille laitteille, joihin myös ilmastointilaitteet kuuluvat. Se antaa muun muassa rakennuksen LVIS-laitteiden aiheuttamat suurimmat sallitut äänitasot asuinhuoneissa. Kyseiset äänitasot on esitetty taulukossa 2. C1 käsittelee myös eri käyttötarkoituksiin olevia rakennuksia, kuten hotelleja, oppilaitoksia sekä hoitolaitoksia, ja niiden äänitekniisiä vaatimuksia.

**TAULUKKO 2. Melun enimmäistasot asunnossa /4, s. 5/**

<b>Tila</b>	<b><math>L_{A,eq,T}</math> (dB)</b>	<b><math>L_{A,max}</math> (dB)</b>
Keittiö	33	38
Muut asuinhuoneet	28	33

Ekvivalenttitasolla eli keskiäänitasolla ( $L_{A,eq,T}$ ) tarkoitetaan laitteen toiminta-ajan mukaista äänitasoa. Sen tehollisarvo on sama kuin vaihtelevan äänitason keskimääräinen tehollisarvo tietyllä ajanjaksolla. A-taajuuspainotetulla enimmäistasolla ( $L_{A,max}$ ) sen sijaan tarkoitetaan voimakkuudeltaan korkeinta äänitasoa tietyllä ajanjaksolla määritetyllä aikapainotuksella. /4, s. 2./ Mikäli asukas voi tehostaa huoneiston ilmanvaihtoa sen vähimmäismäärää suuremmaksi, voidaan äänitasovaatimukset tehostuksen aikana ylittää 10 dB /4, s. 5/. Kyseiset ilmanvaihdon ohjearvot on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2.

Näitä arvoja sovellettaessa on otettava huomioon ilmanvaihdon sekä muiden äänilähteiden yhteisvaikutus. Tämä yhteenlaskettu äänitaso ei saa ylittää sallittua äänitasoa. Kaikkien ääntä aiheuttavien laitteiden äänitasot voidaan laskea yhteen kaavan 11 avulla, jossa  $L_{A,tot}$  on laitteiden yhteisesti aiheuttama äänitaso ja  $L_{A1} \dots L_{An}$  on kunkin laitteen aiheuttama äänitaso. /5, s. 20./

$$L_{A,tot} = 10 \lg(10^{L_{A1}/10} + 10^{L_{A2}/10} + 10^{L_{An}/10}) \quad (11)$$

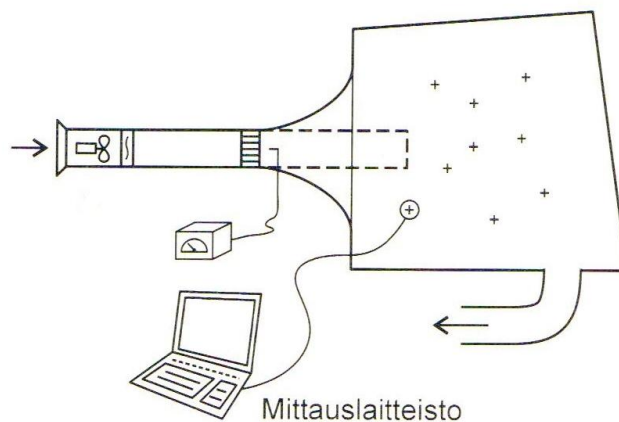
Myös sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeessa on annettu huoneistojen päivä- ja yöajan melutasoille ohjearvoja. Kyseiset arvot koskevat rakennuksen kaikkien laitteiden kokonaismelutasoa, jolle huoneessa oleskeleva henkilö saisi enintään altistua. /1, s. 32./ Näiden lisäksi on olemassa standardi EN 13141-2, joka sisältää rakennuksen ilmanvaihtoa koskevia määräyksiä. Kyseinen standardin osa käsittelee tulo- ja poistoilmalaitteiden suoritusarvojen testausta asuntokohtaisessa ilmanvaihdossa, mutta suurimmaksi osaksi laitteiden ääniteknisiä vaatimuksia ja niihin liittyviä mittausmenetelmiä.



### 3 KAIUNTAHUONEMENETELMÄ

#### 3.1 Yleistä kaiuntahuonemenetelmästä

Kaiuntahuone on ISO-standardin mukainen tila, jonka pinnat tehdään mahdollisimman täydellisesti ääntä heijastaviksi ja jonka jälkikaiunta-aika olisi maksimaalisen suuri. Tarkoituksena siis on, että huoneeseen syntyy diffuusi äänikenttä, jolloin äänenpaine on vakio kaikissa mittauspisteissä. Standardin mukaisen kaiuntahuoneen tilavuus on oltava vähintään  $200 \text{ m}^3$ . /1, s. 20./



**KUVA 2. Kaiuntahuoneen periaate /1, s. 42/**

Periaatekuva kaiuntahuonemenetelmästä on esitetty kuvassa 2. Siinä ääni johdetaan kanavaa pitkin kaiuntahuoneeseen. Kanavan pää voidaan laajentaa siten, ettei päätevaimennusta syntyisi kaiuntahuoneen puolella, tai vaihtoehtoisesti tulokseen voidaan lisätä päätevaimennuksesta syntyvä korjaus. Äänenpainetasot taajuuskaistoittain mitataan useassa eri pisteessä. /1, s. 42./

#### 3.2 Standardit

Kaiuntahuonetta ja siellä tehtäviä mittauksia koskevia standardeja ovat ISO 3741 sekä ISO 5135. Ensimmäiseksi mainittu standardi käsittelee yleisemmällä tasolla kaiuntahuonetta ja sen merkitystä akustisten mittausten kannalta. Siinä muun muassa määritetään kaiuntahuoneen yleiset kriteerit sekä muun muassa taustaäänen ja ilman laatuun liittyvät seikat. Lisäksi standardissa kuvataan kaiuntahuoneessa tehtävien akustisten mittausten suunnittelua sekä niiden toteutusta. /6./

Edelliseen verraten ISO-standardi 5135 käsittelee tarkemmin ilmanvaihtolaitteiden, kuten äänenvaimentimien sekä päätelaitteiden, äänitekniisiä mittauksia kaiuntahuoneessa. Standardissa käydään lävitse muun muassa mitattavien laitteiden asennukseen sekä mittaukseen liittyviä asioita ja määritetään muun muassa, mitä mitatun laitteen mittauspöytäkirja tulisi sisältää. /7./

### 3.3 Fläkt Woods Oy:n kaiuntahuone

Opinnäytetyöhön liittyvät mittaukset suoritettiin Toijalssa Fläkt Woods Oy:n laboratoriotiloissa, jossa oli käytettävissä ISO-standardin 3741 mukainen kaiuntahuone äänitekniisiä mittauksia varten. Kyseinen kaiuntahuone on kooltaan 8 x 5,6 x 5,1 (korkeus) m (228 m<sup>3</sup>). Kuvissa 3 ja 4 on kuvattu osia kyseisestä kaiuntahuoneesta. Kuvassa 3 kanavien päät on johdettu kaiuntahuoneen puolelle viereisestä tilasta, joka toimii virtauslaboratoriona. Virtauslaboratorion puolella sijaitsee muun muassa puhallin sekä puhaltimen sijaan käytettävä äänigeneraattori, ja äänenvaimennin. Kaiuntahuoneen puolella sen sijaan on mittauskanavien päät, joihin mitattavat tuotteet voidaan asentaa. Käytettävissä olevat mittakanavien koot ovat  $\varnothing$  100 – 400 mm. Kuvassa 4 näkyy kaiuntahuoneessa sijaitsevat mittausmikrofonit. Toisella näistä saadaan mitattua huoneen taustäänitaso ennen varsinaisia tuotteiden koemittauksia.



**KUVA 3. Kaiuntahuone osa 1**



**KUVA 4. Kaiuntahuone osa 2**

Kaiuntahuoneessa tehtävät mittaukset ovat tietokoneavusteisia, sillä tilaan on asennettu mittauslaite (Brüel & Kjær), jonka avulla voidaan seurata reaaliaikaisesti mittauksen kulkua sekä lukea mittaustuloksia tietokoneen päätteeltä. Tämän lisäksi kyseistä

mittausta saadaan ohjelmoitua halutulla tavalla esimerkiksi ilmavirtaa säätämällä. Ilmastoinnin akustiikkaan liittyviä mittauksia, joita kyseisessä tilassa voidaan tehdä, ovat virtausmelu- ja vaimennusmittaukset.

## 4 MITTAUKSIEN TOTEUTUS

### 4.1 Mitatut tuotteet

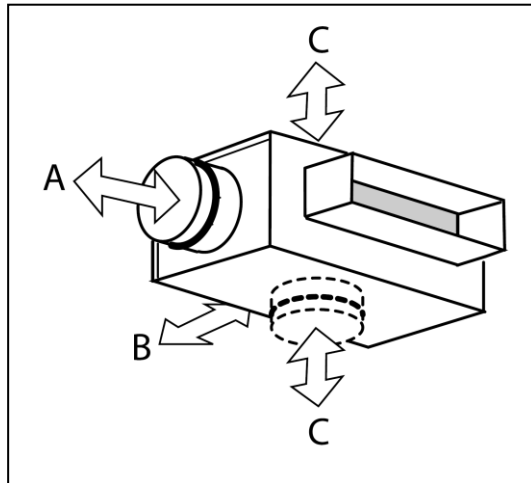
Fläkt Woods Oy:n valikoimaan kuuluu monia tulo- ja poistoilmasäleikköjä sekä niihin kuuluvia tasauslaatikoita. Päätelaitteiden äänenkehitys- ja vaimennusmittaukset suoritettiin neljälle eri tulo- ja poistoilmasäleikölle sekä kahdelle tasauslaatikolle, jotka on esitetty kuvassa 5. Mitattavat tuloilmasäleiköt olivat SV-2 ja AVS, sekä poistoilmasäleiköt SV-1 ja USR. Kyseiset säleiköt mitattiin aina siten, että ne olivat kiinnitettynä niihin kuuluviin tasauslaatikoihin. Tasauslaatikoita on sekä tuloilmalle että poistoilmalle, joista Fläkt Woods käyttää tunnuksia TG ja TGE.



**KUVA 5. Mitattavat päätelaitteet sekä tasauslaatikko /8/**

SV-2 -säleikössä on kahdet suunnattavat säleet; vaakasuorat etusäleet sekä pystysuorat takasäleet. Etusäleillä voidaan virtauskuviota suunnata portaattomasti sekä ylä- että alaviistoon, kun taas takasäleillä voidaan tämän lisäksi säätää myös heittopituutta. Poistoilman SV-1-säleikkö on rakenteeltaan muuten samanlainen kuin edellinen, mutta siinä on ainoastaan vaakasuuntaiset etusäleet. Näistä kahdesta säleiköistä poiketen sekä AVS- että USR-säleiköissä on kiinteät säleet. AVS-säleikkö koostuu kiinteistä vaakasuuntaisista säleistä, ja USR tiheästä ristikkomaisesta säleiköstä. /8.

TG- ja TGE-tasauslaatikot ovat tarkoitettu suorakulmaisille tulo- ja poistomasäleiköille. Laatikossa on pyöreä kanavaliitäntä, joka näkyy myös edellä olevassa kuvassa 5. Tasauslaatikon tarkoituksena on varmistaa tasainen ilmavirtaus säleikölle sen alhaisen äänitason ja hyvän äänenvaimennusominaisuuden ansiosta. /8./ Tasauslaatikoissa on lisäksi kolme eri liitäntätapaa: sivulta (A), takaa (B) ja ylhäältä / alhaalta (C). Kyseiset liitäntätapojen sijainnit on havainnollistettu kuvassa 6.



**KUVA 6. Tasauslaatikon liitäntätavat /8/**

Tasauslaatikossa on myös uusi säätölaite, jolla saadaan helposti valittua haluttu säätöasento liukuvaa numeroasteikkoa apuna käyttäen. Alla olevassa kuvassa 7 on havaintokuva kyseisestä säätölaitteesta. Säätöasennon ollessa 0 säätöelin on täysin kiinni, ja kun sen halutaan olevan täysin auki, säätöarvo on 5. Tästä poiketen mitatessa kanavakoolla  $\varnothing 125$ , säätöasento on täysin auki säätöarvon ollessa 4.



**KUVA 7. Säätölaite /8/**

Tutkimukseen ei myöskään ollut tarkoitus ottaa mukaan jokaista kokoluokkaa tai liitäntätapaa tasauslaatikkoa kohden tuotemäärän laajuuden vuoksi. Taulukossa 3 on esitetty mitattavat TG- ja TGE-tasauslaatikot liitäntätapoineen ja kokoineen. Tutkit-

tavia tasauslaatikoita eri liitántävaihtoehdoilla oli yhteensä 25 kpl. Näiden jokaisen kanssa tehtiin kolme mittausta: yksi ilman säleikköä sekä mittaukset kahdella eri säleiköllä. Näistä eri yhdistelmistä syntyi siis yhteensä 75 mittausta. Liitteeseen 1 on koottu mitattavat yhdistelmät kokonaisuudessaan.

Tasauslaatikoita, jotka mitattiin kaikilla liitántätavoilla, oli yhteensä neljä: tulopuolella TG-200-100 ja TG-300-100 sekä poistopuolella TGE-200-100 ja TGE-400-150. Kyseiset tuotteet on merkitty alla olevaan taulukkoon vihreällä. Myös lopullinen laskentamallin tuloksien analysointi tehtiin näille tuotteille, sillä tällöin saatiin vertailtua laskentamallin toimivuutta jokaisella mahdollisella liitántätavan ja säleikön yhdistelmällä.

Kyseisiä säleikön ja tasauslaatikon liitántätapojen yhdistelmiä tutkimalla pyrittiin saamaan tarkka kuva siitä, miten eri osat vaikuttavat tuotteen lopullisiin äänitietoihin ja oliko esimerkiksi liitántätavalla, säleiköllä tai kanavakoolla yhtenäistä vaikutusta äänenkehityksen ja –vaimennuksen kannalta.

**TAULUKKO 3. Mitattavat tuotteet (poistoilma ja tuloilma)**

Kanavakoko	TGE-tasauslaatikko	Kanavakoko	TG-tasauslaatikko
125	TGE-200-100-A	125	TG-200-100-A
	TGE-200-100-B		TG-200-100-B
	TGE-200-100-C		TG-200-100-C
160	TGE-300-100-C	160	TG-300-100-A
	TGE-400-100-A		TG-300-100-B
200	TGE-300-150-A		TG-300-100-C
	TGE-500-100-C	200	TG-300-150-B
250	TGE-400-150-A		TG-500-100-A
	TGE-400-150-B	250	TG-400-150-C
	TGE-400-150-C		TG-500-150-A
	TGE-400-200-A	315	TG-500-200-B
315	TGE-600-200-B		TG-800-200-A
	TGE-800-200-A		

## 4.2 Mittausjärjestelyt

Tarkoituksena oli siis mitata sekä tuotteiden äänenkehitystä että äänenvaimennusta erilaisilla säleikköjen ja tasauslaatikon liitântätapojen yhdistelmillä. Molemmat mittaukset tehtiin samoilte aikaisemmin esitetyille tuotteille oktaavikaistoittain taajuusalueella 63 ... 8000 Hz. Sekä tulo- että poistoilmalaitteissa noudatettiin samoja mittausjärjestelyitä. Kyseisiä mittausjärjestelyitä käsitellään alla olevissa luvuissa tarkemmin.

Jokaisen mittauspäivän alussa merkittiin ylös sen hetkinen ilman lämpötila, kosteus sekä ilmanpaine, ja mitattiin kaiuntahuoneen taustäänitaso sekä kalibroitiin siellä sijaitsevat mikrofonit. Sekä taustäänitason mittaus että mikrofonien kalibrointi tehtiin tietokoneavusteisesti. Kyseiset kalibroinnit suoritettiin käyttämällä Bruel & Kjaer 4231-kalibraattoria (kuva 8), joka asetettiin mittausmikrofoniin sekä taustäänitason mittausmikrofoniin. Tämän jälkeen tietokone ohjasi mikrofonien kalibroitua ja ilmoitti, kun kalibroinnit olivat onnistuneet.



**KUVA 8. Bruel & Kjaer 4231 -kalibraattori**

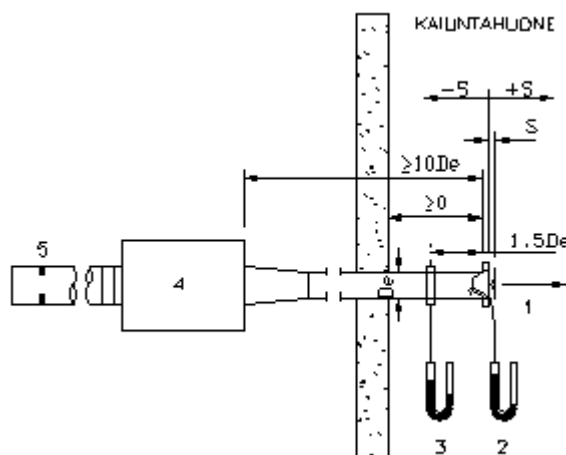
Taustäänitaso mitattiin oktaavikaistoin äänen painetasomittauksena kaiuntahuoneesta puhaltimen ollessa pysäytettynä. Taustäänitaso tulisi olla vähintään 10 dB alhaisempi kuin alimman mitattavan äänitason. Mikäli tämä ero on 6...10 dB, taustäänitasosta aiheutuva korjaus on tehtävä oktaavikaistoittain. Tietokone mittasi taustäänitasosta 16 sekunnin keskiarvon. Kyseisissä mittauksissa pyrittiin, että taustäänitaso jäisi alle 20 dB:n. Myös mittausohjelmaan on asetettu, ettei se hyväksy yli 24 dB taustäänitasoa. Kyseisissä mittauksissa taustäänitasoksi saatiin yleensä noin 19...23 dB.

Sekä taustäänitaso-, äänenkehitys- että vaimennusmittauksissa oli huomioitava, että valaisimet olivat sammutettuina kaiutahuoneesta mittausten aikana, jotta ne eivät vaikuttaisi mittaustulokseen. Myös lämmityspattereiden, ilmanvaihtolaitteiden sekä tilassa olevan nosturin tuli olla pois päältä niistä aiheutuvien äänien vuoksi.

#### 4.2.1 Äänenkehitysmittaus

Päätelaitteen äänenkehitys määritetään tyypillisellä nopeus- ja painealueella sekä säättämällä päätelaitetta ja muuttamalla puhaltimen tehoa. Jokaisen mittauksen yhteydessä määritetään ilmavirta ja painehäviö. Tämän vuoksi mittaustilanteita voi tulla hyvinkin useita. /2, s. 179./ Äänenkehitysmittauksessa äänilähteenä käytettiin virtausmelua siten, että koepuhallin joko imi tai puhalsi ilmaa tarpeen mukaan riittävän matalalla äänitasolla. Päätelaitteet mitattiin käyttämällä useaa eri säätöasentoa. Kanavakoon 125 päätelaitteita mitattaessa käytettiin säätöasentoja 0, 0.2, 0.5, 1, 2, 3, ja 4, ja suuremmissa kokoluokissa äänitasot mitattiin näiden lisäksi myös säätöasennolla 5.

Äänenkehitysmittauksen koejärjestelyitä on havainnollistettu seuraavissa kuvissa 9 ja 10. Ensimmäinen kuva on periaatekuva kyseisestä mittauksesta ja jälkimmäisessä kuvassa näkyy, miten mittausjärjestelyt on käytännössä toteutettu virtauslaboratorion puolella. Tarkennuksena siis, että ilma on johdettu konehuoneesta sijaitsevalta puhaltimelta virtauslaboratorion puolella oleville mittalaipoille ja sieltä äänenvaimentimelle. Mittalaippojen toiminnasta on kerrottu tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.



KUVA 9. Periaatekuva äänenkehitysmittauksesta /9/

Edellisessä kuvassa numeroidut osat ovat seuraavat:

- 1 Mitattava tuote
- 2 Paikallisen paine-eron (mittauspaine-eron) mittaus
- 3 Pietsorengas staattisen paineen mittaukseen
- 4 Äänenvaimennin mittalaipan äänen eliminoimiseksi
- 5 Mittalaippa

Seuraavassa kuvassa (kuva 10) näkyy, miten ilma johdettiin niin sanottua kurtputkea pitkin äänenvaimentimelle ja siitä edelleen suorana kanavana kaiuntahuoneeseen, johon mitattava päätelaite asennettiin. Päätelaitteiden äänenkehitystä mitattaessa äänenvaimentimena käytettiin ns. epäsuoraa äänenvaimenninta, jossa asennuksen helpottamiseksi sisäputki on sijoitettu sen vaippaan nähden epäkeskeisesti. Kanavia asennettaessa kaikki kanavaliitännät tuli tiivistää hyvin, jotta ilmavirta kulkisi tasaisesti kanavassa eikä vuotoja pääsisi esiintymään.



**KUVA 10. Äänitasomittauksen koejärjestelyt**

Mittauksen alkaessa tuli valita kyseiseen mittaukseen sopiva mittalaippa tarvittavan ilmavirran mukaan. Käytettävissä olevia mittalaippoja laboratoriossa oli neljä, joiden ilmamääräalueet on listattu alapuolella olevaan taulukkoon (taulukko 4). Koepuhaltimen jälkeen laboratoriossa sijaitsi neljä rinnakkaista mittakanavaa, joita pitkin ilma voitiin johtaa ilmakammioon ja siitä edelleen äänenvaimentimelle. Näissä jokaisessa mittakanavassa oli asennettuna yksi mittalaippa. Esimerkiksi käyttäessä laippaa 1 ilma johdettiin kyseistä mittakanavaa pitkin puhaltimelle, jolloin muut kanavat suljettiin.



Käytettävästä ilmamäärästä riippuen mittalaipan paine saattoi kasvaa liian suureksi tai jäädä liian alhaiseksi, jolloin mittalaipan kokoa oli vaihdettava ilmamäärälle sopivaksi tilanteen mukaan. Tämä toiminto voitiin tehdä tietokoneelta, jolloin se automaattisesti ohjasi ilmapirran kulkemaan valittua reittiä pitkin puhaltimelle.

#### TAULUKKO 4. Mittalaipat ilmamäärineen

Mittalaippa / vapaan pinta-alan halkaisija [mm]	Toiminta-alue [l/s]
Laippa 1 / 40,3	1...33
Laippa 2 / 65,7	13...100
Laippa 3 / 114,5	60...300
Laippa 4 / 205	100...1000

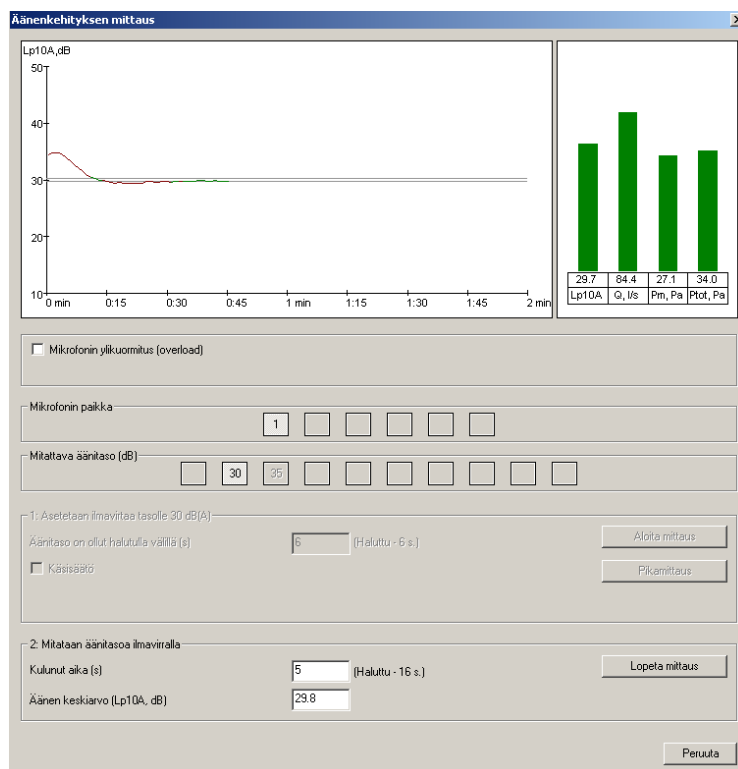
Kuvassa 11 on kuvattu tasauslaatikko asennettuna kaiuntahuoneen puolella mittakanavan päähän. Päätelaitteen mittauksissa tuli huomioida, että niin sanottu paineletku oli yhdistetty mittakanavaan staattisen paine-eron mittaamista varten (kuva 9, kohta 3). Jotta mittauspaine-ero saatiin myös mitattua, oli siihen tarkoitettut paineletkut kiinnitettävä päätelaitteen säätöelimessä oleviin mittayhteisiin (kuva 9, kohta 2). Tämän lisäksi oli tarkistettava, että päätelaite oli asennettu kunnolla ja mahdollisimman tiiviisti mittakanavaan. Myös säätölaitteen toimivuus oli hyvä tarkistaa ja se, että ilma pääsisi virtaamaan esteittä päätelaitteen lävitse.



KUVA 11. Tasauslaatikko asennettuna mittakanavaan

Päätelaitteen äänenkehitys mitattiin siis ensimmäiseksi pelkälle tasauslaatikolle, ja tämän jälkeen molemmille säleiköille niin, että ne olivat kiinnitettyinä tasauslaatikoon. Kuvassa 12 on esimerkki äänenkehityksen mittauksesta. Siinä mittausohjelma

säätii puhaltimen ilmavirtaa siten, että kaiuntahuoneessa tuote aiheutti ensin äänitason 30 dB(A) ja sitten 35 dB(A). Mittausohjelmassa pystyi reaaliaikaisesti tarkkailemaan, miten äänitaso hakeutui haluttuun arvoon ilmavirran säädön avulla. Äänitason oli py-  
syttävä halutulla alueella 6 sekuntia, minkä jälkeen ohjelma mittasi 16 sekunnin kes-  
kiarvon sekä äänitasosta, painehäviöstä että ilmavirrasta. Äänitason keskiarvo sai poi-  
keta halutusta arvosta enintään  $\pm 0,3$  dB. Kuvan 11 käyrän ollessa vihreä se on saavut-  
tanut halutun alueen.

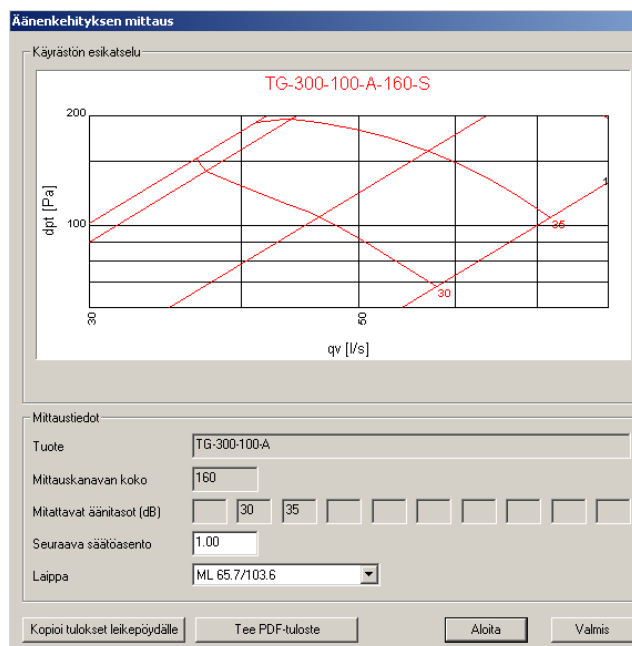


**KUVA 12. Äänenkehityksen mittaus**

Mittaukset aloitettiin käyttämällä pienintä säätöelimen avausasentoa eli 0-asentoa. Kun ohjelma oli mitannut 30 dB:n ja 35 dB:n äänitasoista 16 sekunnin keskiarvot, mittausohjelma piirsi ensimmäiset pisteet tuotteen painekäyrästä. Säätöasentoa vaihtamalla ohjelma piirsi sitten loput säätöasentokohtaiset pisteet kyseiselle käyrälle, josta syntyi tuotteen lopullinen kokonaisäänitasokäyrä.

Kuvassa 13 on havainnollistettu, miten mittausohjelma muodosti kyseiset 30 ja 35 dB:n äänitasokäyrät mitattavalle tuotteelle. Tässä esimerkissä mittaus on tehty pelkälle TG-tasauslaatikolle A-liitäntätavalla, ja äänikäyrä on piirretty säätöasennolle 0, 0.2 sekä 0.5. Seuraavaksi äänenkehitysmittaus suoritettiin säätöasennolla 1, minkä jälkeen

mittausohjelma jatkoi kyseisen äänitasokäyrän piirtämistä saatujen mittaustulosten perusteella.



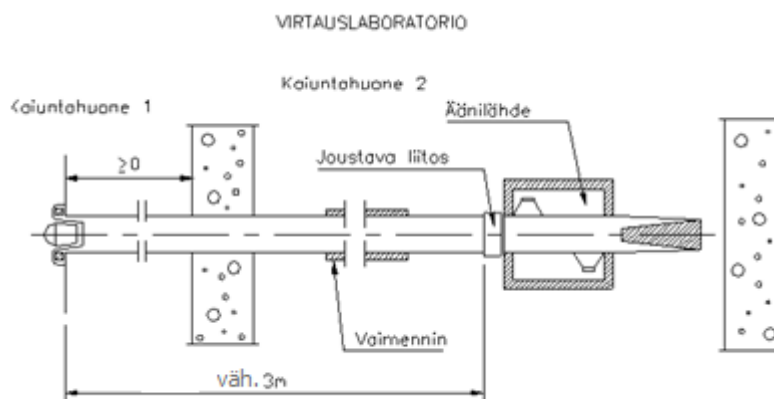
**KUVA 13. Äänitasokäyrän muodostus**

#### 4.2.2 Vaimennusmittaus

Päätelaitteen vaimennusmittauksen tarkoituksena oli selvittää päätelaitteen vaimennuskyky äänen kulkeutuessa kanavasta huoneeseen. Toisin kuin äänenkehitysmittauksessa, tässä melu kanavaan aiheutettiin laajakaistaista kohinaa tuottavan äänigeneraattorin avulla, eikä ilmvirtaa käytetty siis lainkaan. Koska kaikki tutkittava ääni tuotetaan äänekkäällä generaattorilla, ei vaimennusmittauksia varten yleensä tarvita erityisen hiljaista mittaussympäristöä /2, s. 178/.

Vaimennusmittaukset suoritettiin käyttämällä vain yhtä päätelaitteen säätöelimen avausasentoa. Jotta kyseinen säätöasento saatiin valittua, suoritettiin muutamia vaimennuksen testimittauksia. Näistä voitiin todeta, että päätelaitteen vaimennus oli liki samansuuruinen jokaisella säätöasennolla. Ainoastaan reunimmaisilla oktaavikaistoilla 63 Hz ja 8000 Hz oli merkittävimmät eroavaisuudet, mutta näitä ei tarvinnut ottaa huomioon, sillä kyseisten päätelaitteiden vaimennusarvot ilmoitetaan tuote-esitteissä ainoastaan oktaavikaistoilla 125...4000 Hz. Tämän perusteella päätettiin, että vaimennusmittaukset suoritetaan säätöasennon ollessa täysin auki. Pienimmällä kanavakoolla ( $\phi 125$ ) käytettiin siis tällöin säätöarvoa 4 ja sitä suuremmilla arvoa 5.

Päätelaitteen tuottama lisävaimennus mitattiin kuvan 14 mittausjärjestelyä noudattaen. Siinä äänilähde sijoitettiin virtauslaboratorion puolelle, jonka jälkeen kanavaan asennettiin äänenvaimennin vaimentamaan kanavassa kulkeutuvaa ääntä, jotta kaiuntahuoneeseen purkautuvan äänen painetaso ei kohonnut liian suureksi. Kyseisen vaimentimen äänenvaimennus on vähintään 5 dB jokaisella oktaavikaistalla. Myös äänilähteen ja kaiuntahuoneessa sijaitsevan päätelaitteen välisen etäisyyden oli oltava vähintään 3 metriä. /9./



**KUVA 14. Vaimennus kanavasta huoneeseen /9/**

Alla olevassa kuvassa 15 näkyy, miten mittausjärjestelyt virtauslaboratorion puolella toteutettiin käytännössä. Siinä äänigeneraattori on nostimen avulla asennettu mitta-kanavan päähän, ja tämän jälkeen kanavassa oli vaimennusmittauksissa käytettävä ns. suora äänenvaimennin, jossa liitoskohta oli keskellä vaimenninta. Äänenvaimentimen jälkeen kanava johdettiin seinämän lävitse kaiuntahuoneeseen.



**KUVA 15. Vaimennusmittauksen koejärjestelyt**

Kanavan säteilemä äänitehotaso määritettiin kaiuntahuoneessa kahdesti /2, s. 178/. Huoneeseen päättyvään kanavaan aiheutettiin ääni äänigeneraattorin avulla, ja ensimmäisellä mittauksella äänenpainetasot mitattiin oktaavikaistoin ilman päätelaitetta avoimella kanavan päällä. Tämän jälkeen mitattava päätelaite asennettiin kaiuntahuoneen puolelle kanava-aukkoon, ja äänenpainetasot mitattiin uudelleen samoissa pisteissä. Mittauksissa oli hyvin tärkeää, että äänilähde lähetti kummassakin tapauksessa samanlaista ja samantasoista ääntä. /9./

Päätelaitteen ollessa asennettuna kanava-aukkoon vaimennusmittaus kyseiselle tuotteelle oli hyvä suorittaa useamman kerran, jolloin päätelaitteen vaimennusarvoksi saatiin näiden mittauksien keskiarvo. Päätelaitteen asennustapa tuli mittausohjelmassa valita siten, että tämä keskimääräinen äänenvaimennus  $\Delta L$  sisälsi päätelaitteeseen liittyvän mittakanavan päätevaimennuksen seinäasennuksessa. Tällöin tulokset olivat suoraan verrattavissa tuote-esitteen äänitietoihin.

Äänenvaimennus  $\Delta L$  voidaan määrittää oktaavikaistoittain kaiuntahuoneesta mitattujen äänen painetasojen  $L_{p1}$  ja  $L_{p2}$  erotuksena yhtälön 12 avulla /9/. Kyseinen yhtälö oli kuitenkin määritetty laboratoriossa olevaan mittausohjelmaan valmiiksi, jolloin se ilmoitti lopulliseksi mittauksena suoraan päätelaitteen äänenvaimennuksen  $\Delta L$ .

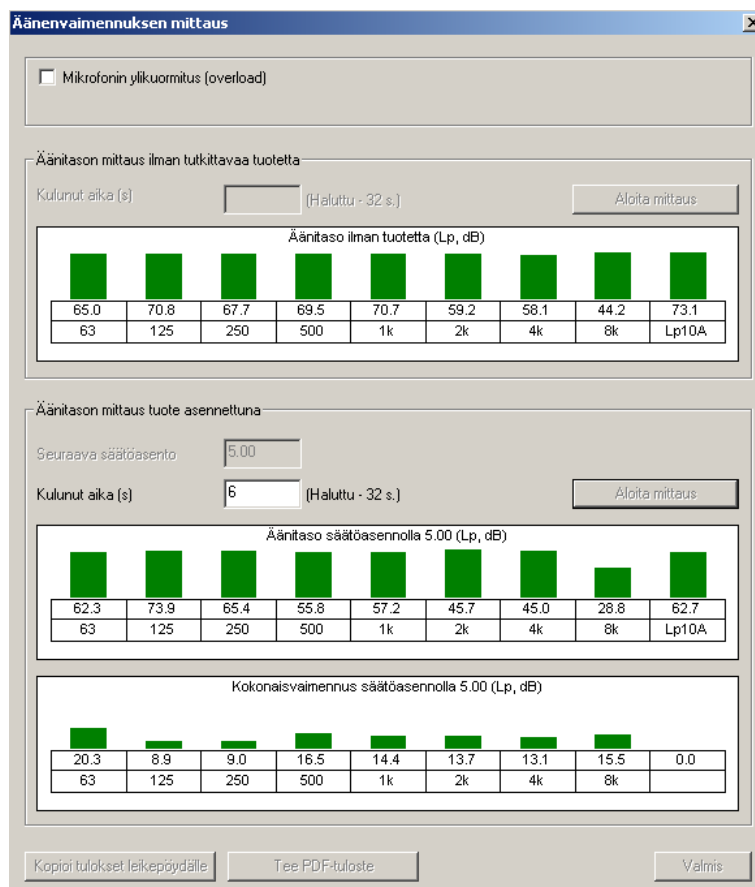
$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} \quad (12)$$

$\Delta L$  päätelaitteen äänenvaimennus, dB

$L_{p1}$  äänen painetaso avoimella kanava-aukolla, dB

$L_{p2}$  äänen painetaso päätelaitteen ollessa asennettuna mittakanavaan, dB

Seuraavan sivun kuvassa 16 on esimerkki käynnissä olevasta päätelaitteen vaimennusmittauksesta. Ylimpänä kuvassa näkyy mitattu äänitaso  $L_{p1}$  oktaavikaistoittain ilman päätelaitetta avoimella kanava-aukolla, ja tämän alla reaaliaikaiset mittaukselliset äänitasot  $L_{p2}$ , kun päätelaite oli asennettuna mittakanavan päähän. Alimpana näkyy päätelaitteen kokonaisvaimennus  $\Delta L$ . Kaiuntahuoneessa vallitsevat äänen painetasot mitattiin käyttäen 32 sekunnin mittausaikaa, jolloin  $L_{p1}$  ja  $L_{p2}$  edustivat tällä välillä mitattujen tulosten keskiarvoja /9/. Kyseinen vaimennusmittaus suoritettiin vähintään kolme kertaa jokaiselle päätelaitteelle.



**KUVA 16. Vaimennusmittaus**

## 5 TULOKSET SEKÄ NIIDEN ANALYSOINTI

Sekä päätelaitteiden äänenkehityksen että vaimennuksen mittaustulokset saatiin mittaushjelman kautta kopioitua tietokoneen leikepöydälle ja sitä kautta siirrettyä esimerkiksi Excel-laskentaohjelmaan. Näin ollen saatiin jokaisesta tehdystä mittauksesta mittauspöytäkirja, johon oli kirjattu kyseisen mittaustilanteen taustatiedot sekä mittaustulokset. Äänenkehityksen kokonaisäänitasot ilmoitettiin mittaustuloksissa A-taajuuspainotettuina äänenpainetasoina (dB). Vaimennusmittausten oktaavikaistoittaiset tulokset eivät sen sijaan sisältäneet A-painotusta. Esimerkit äänenkehitys- ja vaimennusmittausten mittauspöytäkirjoista on esitetty liitteessä 2.

Saatujen mittaustulosten perusteella voitiin tutkia tuotteiden äänitekniisiä ominaisuuksia ja näin ollen muodostaa laskentamalli, jota voitaisiin hyödyntää määrittäessä sekä päätelaitteen äänenkehitystä että sen vaimennuskykyä. Laskentamallin kehittämisen tarkoituksena siis oli, että jatkossa äänenkehitys- ja vaimennusmittauksia ei tarvitsi mitata jokaisella tasauslaatikon liitännätavalla tai säleiköllä, vaan mittaukset voi-

taisiin suorittaa ainoastaan yhdelle tasauslaatikolle säleikkökokoja kohden käyttämällä vain yhtä liitântätapaa. Laskentamallissa määriteltyjen erilaisten korjaustermien avulla tasauslaatikon äänitaso ja äänenvaimennus olisivat muunnettavissa lopuille liitântäta-voille sekä säleiköille niiden ollessa asennettuina ko. tasauslaatikoon. Mittaukset olisi kuitenkin suoritettava sekä tulo- että poistoilman tasauslaatikoille (TG ja TGE).

Koska laskentamallin kehitykseen liittyvät lopulliset tarkistuslaskelmat tehtiin ainoas- taan aikaisemmin mainituille neljälle tasauslaatikolle käyttäen jokaista liitântätapaa, laskentamalli oli kyseisten korjaustermien avulla yleistettävä käytettäväksi kaikille tuotteille niiden ääniominaisuuksien laskemiseksi. Nämä termit saatiin muodostettua siten, että aluksi mittaustuloksia oli käsiteltävä Excel-ohjelman avulla, jossa saatiin tehtyä erilaisia laskutoimituksia sekä vertailuja tuotteiden välillä. Tämän jälkeen tuot- teista etsittiin yhtäläisyyksiä esimerkiksi tasauslaatikon liitântätapojen, kanavakokojen sekä säleikköjen välillä. Seuraavissa alaluvuissa on selostettu sekä äänitaso- että ää- nenvaimennusmittauksien tulosten käsittelyä sekä niiden analysointia. Liitteisiin 3 ja 4 on koottu lopulliset vertailut laskentamallin tuloksista koskien molempia mittauksia.

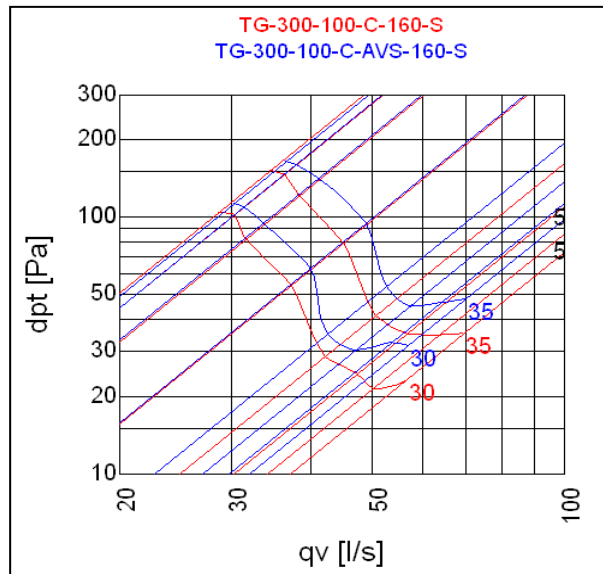
## **5.1 Äänitasomittaus**

### **5.1.1 Tulosten käsittely**

Jokaisesta mittauksesta saatiin mittausohjelman avulla piirrettyä 30 ja 35 dB:n koko- naisäänitasokäyrät sekä säleikkö-laatikko -yhdistelmille että pelkille tasauslaatikoille. Säleikön vaikutusta pystyttiin myös tutkimaan vertailukäyrästäjien avulla, joista pystyi näkemään sekä pelkän tasauslaatikon että yhdistelmän äänitasokäyrät. Oletuksena oli, että tuotteen äänenkehitys tulisi pieneneään säleikön vaimennusominaisuuden vuok- si. Saaduista vertailukäyrästäjistä voitiinkin todeta, että suurimmalla osalla tuote ei kehittänyt yhtä paljon ääntä säleikön ollessa kiinnitettynä tasauslaatikoon. Poikkeuk- sena tästä osalla tuotteista oli hieman eroavaisuutta pienimmillä säätöasennoilla, jol- loin tuote kehittäikin enemmän ääntä säleikön kanssa.

Kuvassa 17 on esimerkki kokonaisäänitasovertailusta, jossa säleiköllä on selkeä vai- mentava vaikutus tuotteen äänenkehityksessä. Siinä punainen käyrä kuvaa pelkän ta- sauslaatikon TG-300-100 äänitasoa C-liitântätavalla, ja sininen käyrä kyseisen laati-

kon äänitasoa AVS-säleikön kanssa. Käyrästä äänitasot on ilmoitettu äänen kokonaispainetasona  $L_{p10A}$ , dB(A).



**KUVA 17. Kokonaisäänitasovertailu**

Vertailtaessa säleikkö-laatikko -yhdistelmän ja pelkän laatikon äänitasokäyriä niiden painekäyrät poikkesivat yleisesti ottaen melko vähän toisistaan. Tästä johtuen tehtiin oletus, että samoja painekäyriä voidaan käyttää sekä säleikön ja tasauslaatikon yhdistelmille että pelkille laatikoille tulosten tarkastelussa. Suurimmat eroavaisuudet painekäyrien välillä oli isoimmilla säätöasannoilla, niin kuin kyseisessäkin esimerkissä.

Tuotteen oktaavikaistoittainen äänitehotaso  $L_{w,okt,säl}$  saadaan laskettua lisäämällä äänen kokonaispainetasoon  $L_{p10A}$  oktaavikaistojen korjaustermi  $K_{okt}$  seuraavasti:

$$L_{w,okt,säl} = L_{p10A,säl} + K_{okt} \quad (13)$$

$L_{w,okt,säl}$  äänitehotaso säleikkö-laatikko -yhdistelmälle oktaavikaistoittain, dB

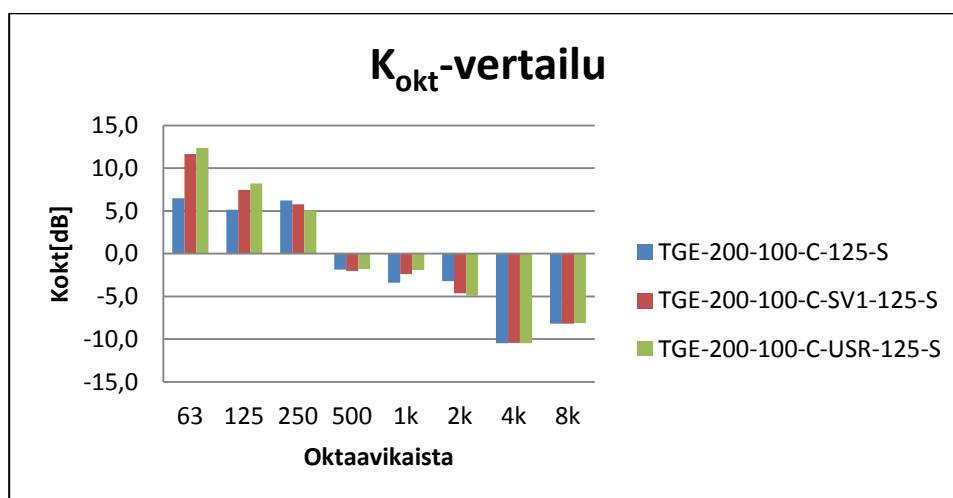
$L_{p10A,säl}$  äänen kokonaispainetaso säleikkö-laatikko -yhdistelmälle, dB

$K_{okt}$  oktaavikaistoittainen korjaustermi, dB

Oktaavikaistoittaiset korjaustermit  $K_{okt}$  on laskettu mittausohjelman avulla jokaiselle tuotteelle säätöasannoittain, ja arvot on kirjattu mittauspöytäkirjoihin. Näistä arvoista laskettiin keskiarvot oktaavikaistoittain, ja niitä vertailtiin pelkän tasauslaatikon ja säleikköjen välillä. Tuloksien perusteella  $K_{okt}$ -arvoissa ei eroavaisuutta ollut juuri



lainkaan vertailtaessa kahta säleikköä keskenään. Pelkän tasauslaatikon ja säleikön välillä eroa oli hieman enemmän, mutta ei kuitenkaan merkittävästi. Kuvassa 18 on esimerkki kyseisestä vertailusta. Siinä sininen pylväs kuvaa pelkän TGE-tasauslaatikon  $K_{\text{okt}}$ :n keskiarvoja C-liitántätavalla oktaavikaistoittain, ja punainen sekä vihreä pylväs säleikkö-laatikko –yhdistelmien  $K_{\text{okt}}$ -arvoja. Vertailuissa eniten eroavaisuutta näiden arvojen välillä oli keskimääräisesti pienimmällä taajuuskaistalla, mutta koska kyseisten tuotteiden äänitiedot ilmoitetaan vain oktaavikaistoilla 125...4000, ei tällä ollut niin suurta merkitystä tulosten tarkastelussa. Myös alla olevassa vertailukuvassa kyseinen eroavaisuus on suurimmillaan tällä oktaavikaistalla.

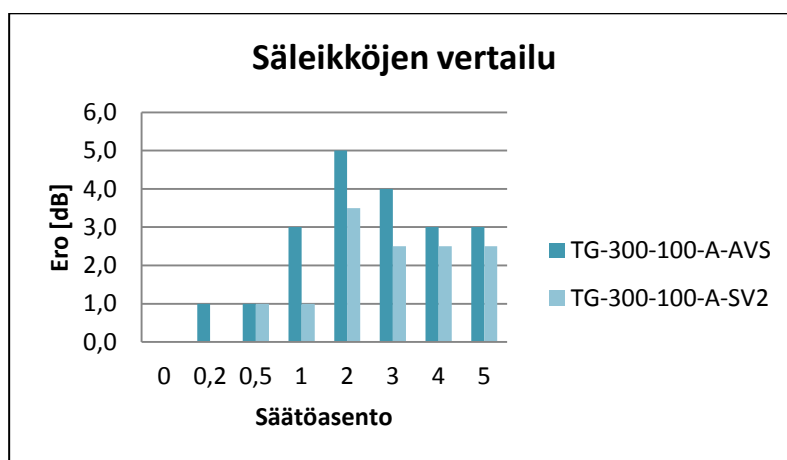


**KUVA 18.  $K_{\text{akt}}$  –vertailu pelkän tasauslaatikon ja säleikkö-laatikko –yhdistelmän välillä**

Kyseisten vertailujen perusteella siis tasauslaatikon  $K_{\text{akt}}$ -arvoja voitiin käyttää myös säleiköille. Tämä tarkoitti, että säleikön vaikutus pelkän tasauslaatikon äänitasoon oli kaikilla oktaavikaistoilla lähes sama. Tästä johtuen äänenkehityksen laskentamallia muodostaessa voitiin käsitellä pelkästään kokonaisäänitasoja, jolloin laskentamallia ei tarvinnut tehdä oktaavikaistoittain.

Tämän jälkeen kokonaisäänitason vertailukäyrästä laskettiin manuaalisesti säleikön ja tasauslaatikon sekä myös tasauslaatikkojen liitántätapojen väliset eroavaisuudet säätöasennoittain. Säleikön ja tasauslaatikon välisissä vertailuissa säleikön äänitasoja verrattiin aina pelkän laatikon äänitasoihin, ja vertailtaessa eri liitántätapoja, vertailukohteena oli aina A-liitántätapa. Liitántätapojen vertailut tehtiin vain niille tasauslaatikoille, joista oli mitattu kaikki liitántätavat.

Eroavaisuuksista tehtiin myös pylväsdiagrammit, joista voitiin helposti vertailla esimerkiksi kahden eri säleikön vaikutuksia äänenkehitykseen. Pääsääntöisesti voitiin todeta, että AVS-tuloilmasäleikkö ja USR-poistoilmasäleikkö vähensivät eniten tuotteen äänenkehitystä. USR-säleikön kohdalla tämä voi johtua siitä, että kyseisessä säleikössä on ns. säleikköpinta-alaa enemmän kuin muissa säleiköissä. Toisin sanoen kyseisen säleikön vapaa aukko on pienempi kuin SV1-poistoilmasäleiköllä. AVS-säleiköllä ns. säleikköpinta-alaa on kuitenkin lähes saman verran kuin SV2-säleiköllä, jolloin tämän kohdalla vaikutus tuotteen äänenkehityksen vähenemiseen saattoi johtua esimerkiksi säleiden muotoilusta.

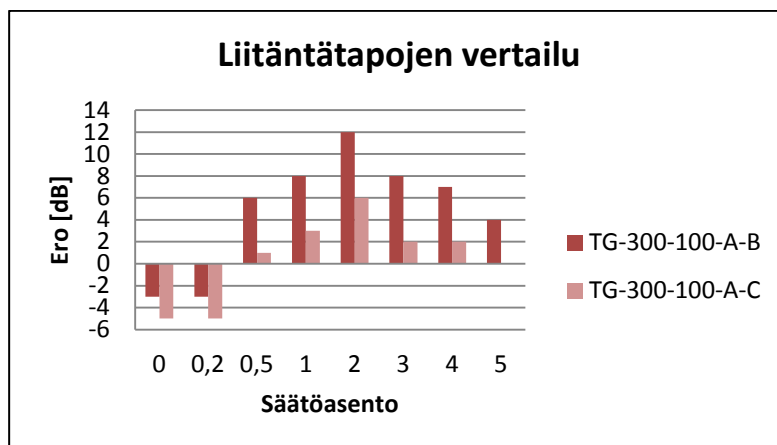


**KUVA 19. Tuloilmasäleikköjen vaikutus äänenkehitykseen**

Kuvassa 19 on esimerkki tuloilmasäleikköjen vaikutuksesta äänenkehitykseen tasauslaatikolla TG-300-100-A. Siinä tummansininen pylväs kuvaa AVS-säleikön ja vaaleansininen SV2-säleikön välistä eroa pelkkään tasauslaatikkoon liitännätavalla A. Mikäli kyseinen arvo on positiivinen ja mitä suurempi se on, sitä enemmän kyseinen säleikkö vähentää äänenkehitystä.

Kuvassa 20 on puolestaan esimerkki liitännätapojen välisestä äänenkehityksen vertailusta. Kuvaajassa tummanpunainen pylväs kuvaa B-liitännätavan ja vaaleanpunainen C-liitännätavan äänenkehitystä verrattaessa liitännätapaan A. Kuten edellisessäkin esimerkissä, mitä suurempi (positiivisempi) eroavaisuus on, sitä enemmän kyseinen liitännätapa vähentää äänenkehitystä verrattuna A-liitännään. Näiden liitännätapojen vertailujen avulla voitiin todeta, että tuloilmapuolella tasauslaatikon B-liitännätapa kehitti vähemmän ääntä kuin C-liitäntä verratessa kyseisiä arvoja A-liitännään. Poistopuolella sen sijaan eroavaisuudet B- ja C-liitännätapojen välillä olivat pienemmät ja hyvin vaih-

televat säätöasennoittain, eikä näin ollen voida tarkkaan sanoa, kumpi liitântätapa kehitti enemmän ääntä.



**KUVA 20. Liitântätapojen äänenkehityksen vertailu**

Tehdyistä vertailuista tuli seuraavaksi löytää joitain yhtäläisyyksiä, joiden avulla tulokset ja laskentamalli voitiin yleistää koko säleikkövalikoimalle, myös niille kokoluokille ja liitântätavoille, joita ei tässä tutkimuksessa mitattu. Tarkoituksena siis oli tutkia, oliko äänenkehitys samansuuntaista esimerkiksi säleikköjen tai liitântätapojen välillä eri säätöasennoilla ja vaikuttiko mittakanavan tai säleikön koko kyseiseen asiaan. Tuotteiden välisistä vertailuista voitiin todeta, että säleiköillä ja tasauslaatikon liitântätavoilla näytti olevan eniten yhtäläisyyksiä, kun taas kanavakoolla ei tuntunut olevan minkäänlaista yhdistävää vaikutusta päätelaitteen äänenkehityksessä.

### 5.1.2 Laskentamallin kehittäminen

Laskentamallin tarkoituksena siis oli, että päätelaitteen äänenkehitysmittaus voitaisiin suorittaa ainoastaan yhdelle tasauslaatikolle tietyllä säleikkökoolla, ja tämän mittauksen perusteella laskettaisiin äänenkehitykset myös säleiköille sekä kyseisen laatikon eri liitântätavoille. Tätä varten oli muodostettava korjaustermit, joiden avulla edellä mainitut muunnokset voitiin laskea. Kyseiset termit määritettiin laskemalla aikaisemmin esitetyistä, sekä säleikkö-laatikko-yhdistelmien ja pelkkien tasauslaatikoiden että liitântätapojen välisistä, eroavaisuuksista keskiarvot säätöasennoittain. Näiden avulla voitiin muodostaa säleiköille ns. uudet, laskennalliset äänenpainetasot ja verrata näitä mitattuihin säätöasentokohtaisiin arvoihin. Lopulliset vertailut tehtiin ainoastaan niille tuotteille, joiden äänitasot oli mitattu kaikilla liitântätavoilla. Tällöin laskentamallin toimivuutta voitiin tutkia jokaisella säleikön ja liitântätavan yhdistelmällä.

Näin ollen keskiarvoista saatiin yhteensä 16 korjaustermiä: 12 säleikön korjaustermiä  $K_{säl}$  (säleikkö-laatikko -yhdistelmille A-SV2, A-AVS, A-SV1, A-USR, B-SV2, B-AVS, B-SV1, B-USR, C-SV2, C-AVS, C-SV1, C-USR) sekä neljä liitännätavan korjaustermiä  $K_{liit}$  (pelkille tasauslaatikoille TG-B, TG-C, TGE-B ja TGE-C). Nämä termit olivat suoraan sijoitettavissa laskentamalliin. Tässä esimerkiksi  $K_{A-SV2}$  tarkoittaa SV2-säleikön korjaustermiä A-liitännällä, jolloin keskiarvot on laskettu kaikista kyseisen säleikön ja tasauslaatikon äänitasojen eroavaisuuksista A-liitännällä.  $K_{TG-B}$  puolestaan tarkoittaa pelkkää tuloilman tasauslaatikkoa B-liitännällä, jossa keskiarvoista muodostettu korjaustermi on saatu laskemalla kaikkien kyseisten laatikoiden äänitasojen eroavaisuuksien keskiarvo verrattuna A-liitännään. Liitteessä 5 on esitetty arvot kyseisille korjaustermeille. Yleisellä tasolla laskentamallin yhtälö äänitasoille säätöasennoittain on seuraava:

$$L_{p10A,säl,lask} = L_{p10A,laat} - (K_{liit} + K_{säl}) \quad (14)$$

$L_{p10A,säl,lask}$  laskennallinen äänenpainetaso säleikkö-laatikko -yhdistelmälle säätöasennoittain, dB

$L_{p10A,laat}$  mitattu äänenpainetaso pelkälle tasauslaatikolle säätöasennoittain, dB

$K_{liit}$  liitännätavan korjaustermi säätöasennoittain, dB

$K_{säl}$  säleikön korjaustermi säätöasennoittain, dB

Yhtälöissä 15 ja 16 on esitetty, miten liitännätavan ja säleikön korjaustermit ( $K_{liit}$  ja  $K_{säl}$ ) säätöasennoittain on muodostettu äänenkehityslaskelmissa.

$$K_{liit} = \bar{x} = \frac{\sum(L_{p10A,A} - L_{p10A,BC})}{n_{tuote}} \quad (15)$$

$K_{liit}$  liitännätavan korjaustermi säätöasennoittain, dB

$\bar{x}$  keskiarvo säätöasennoittain, dB

$L_{p10A,A}$  äänenkehitys tasauslaatikon A-liitännätavalla säätöasennoittain, dB

$L_{p10A,BC}$  äänenkehitys tasauslaatikon B- tai C-liitännätavalla säätöasennoittain, dB

$n_{tuote}$  tuotteiden lukumäärä B- tai C-liitännällä

$$K_{säl} = \bar{x} = \frac{\sum(L_{p10A,laat} - L_{p10A,säl})}{n_{tuote}} \quad (16)$$

$K_{säl}$	säleikön korjaustermi säätöasennoinnain, dB
$\bar{x}$	keskiarvo säätöasennoinnain, dB
$L_{p10A,laat}$	äänenkehitys pelkälle ko. tasauslaatikolle säätöasennoinnain, dB
$L_{p10A,säl}$	äänenkehitys säleikkö-laatikko –yhdistelmälle säätöasennoinnain, dB
$n_{tuote}$	tuotteiden lukumäärä ko. säleiköllä ja tasauslaatikon liitännätavalla

Koska aikaisemmin tehdyissä vertailuissa A-liitännätapaa käytettiin aina vertailuarvona, myös tämän laskennan pohjana käytettiin pelkän tasauslaatikon käyrästää kyseisellä liitännätavalla, esimerkiksi TG-200-100-A. Mikäli laskenta tehtiin säleikölle käyttäen A-liitännätapaa, yhtälössä huomioitiin ainoastaan kyseisen säleikön korjaustermi  $K_{säl}$ . Liitännätavan korjaustermi  $K_{liit}$  käytettiin siis silloin, kun haluttiin laskea äänenkehitys joko B- tai C-liitännätavalle.

Seuraavassa laskentaesimerkissä käsitellään TG-200-100 –tasauslaatikon ja AVS-säleikön laskennallista äänenkehitystä B-liitännätavalla ja verrataan saatua tulosta tuotteen mitattuun äänenkehitykseen. Liitännätapojen ja säleikköjen korjaustermit ( $K_{liit}$  ja  $K_{säl}$ ) voitiin laskea etukäteen yhteen, eli esimerkiksi  $K_{TG-B} + K_{B-AVS}$ . Termien yhteenlaskettu arvo kertoi, kuinka paljon äänikäyrää oli siirrettävä verrattuna tasauslaatikon käyrään. Mikäli korjaustermien  $K$  arvo oli positiivinen, liikuttiin tasauslaatikon painekäyrästöllä ylöspäin, ja mikäli se oli negatiivinen, alaspäin. Verraten yhtälöön 14 tämän esimerkin laskentakaava on seuraava:

$$L_{p10A,TG-200-100-B-AVS} = L_{p10A,TG-200-100-A} - (K_{TG-B} + K_{B-AVS}) \quad (17)$$

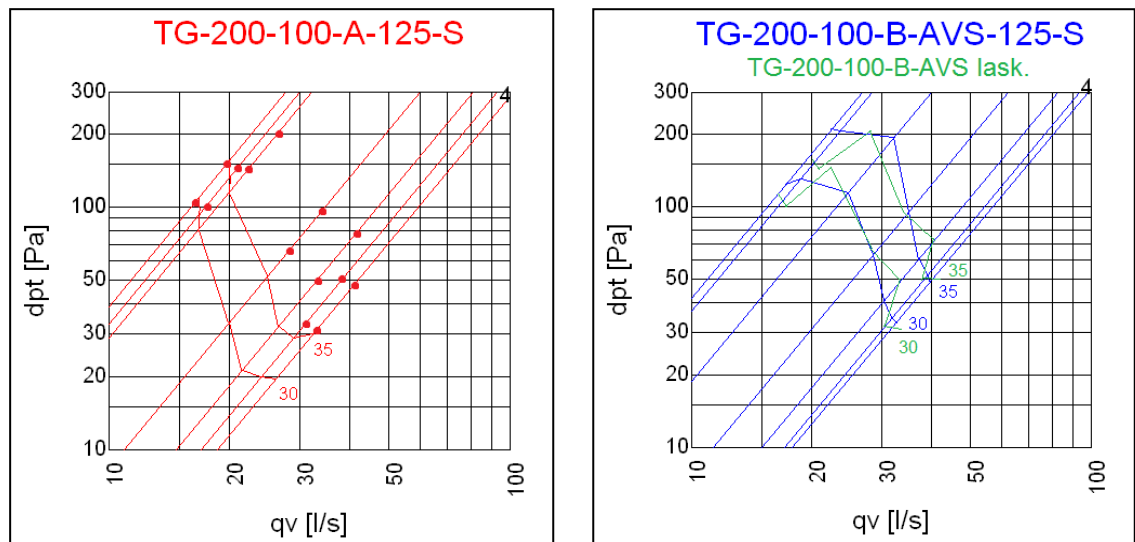
$L_{p10A,TG-200-100-B-AVS}$	laskennallinen äänenkehitys AVS-säleikölle B-liitännällä säätöasennoinnain, dB
$L_{p10A,TG-200-100-A}$	mitattu äänenkehitys tasauslaatikolle liitännätavalla A säätöasennoinnain, dB
$K_{TG-B}$	korjaustermi B-liitännätavalle säätöasennoinnain, dB (liite 5)
$K_{B-AVS}$	korjaustermi AVS-säleikölle B-liitännätavalla säätöasennoinnain, dB (liite 5)

Kyseinen lasku suoritettiin siis jokaiselle mitatulle säätöasennolle, ja tuloksena tästä saatiin tuotteen TG-200-100-B-AVS äänitaso. Esimerkkinä edellä mainittujen korjaustermien  $K_{TG-B} + K_{B-AVS}$  yhteenlaskettu termi  $K$  oli 5,6 dB säätöasennolla 4. Tällöin

TG-200-100-B-AVS –yhdistelmän äänitaso oli 24,4 dB siinä pisteessä, jossa se TG-200-100-A –tuotteella oli 30 dB kyseisellä säätöasennolla. Käyrästöjen piirtämistä helpottamiseksi laskukaava käännettiin muotoon

$$L_{p10A,TG-200-100-A} = L_{p10A,TG-200-100-B-AVS} + (K_{TG-B} + K_{B-AVS}). \quad (18)$$

Tämän avulla saatiin laskettua pisteet TG-200-100-A –tuotteen äänikäyrästä, jossa TG-200-100-B-AVS –yhdistelmän äänitaso oli 30 ja 35 dB. Yhteenlasketun korjaus-termin  $K$  ollessa 5,6 dB, esimerkiksi TG-200-100-B-AVS –yhdistelmän äänitaso oli 30 dB samassa pisteessä, jossa se TG-200-100-A –tuotteella oli 35,6 dB kyseisellä säätöasennolla. Nämä pisteet, jotka kuvasivat säleikön laskettuja 30 ja 35 dB:n äänitasoja, piirrettiin tasauslaatikon TG-200-100-A äänitasokäyrästä sen painekäyriä pitkin säätöasunnoittain.



**KUVA 21. Pisteiden sijoitus korjaustermien avulla sekä äänitason vertailukäyrä**

Kuvassa 21 on havainnollistettu pisteiden sijoitus kyseiseen käyrästä sekä laskennallisen äänitason vertailu säätöasunnoittain. Tämän jälkeen pisteet siirrettiin tässä esimerkissä B-liitännällä mitatun AVS-säleikön äänikäyrästä kokonaispainehäviön  $\Delta p_t$  ja ilmavirran  $q_v$  mukaan, ja niiden avulla säleikön laskennallinen äänikäyrä piirrettiin mitatun käyrän päälle. Näin ollen saatiin kaksi vertailukelpoista äänitasokäyrää kyseiselle säleikölle, jolloin voitiin tutkia laskentamallin onnistuneisuutta kyseisellä tuotteella. Edellisessä kuvassa on esitetty myös kyseinen vertailukäyrästä, jossa sininen käyrä kuvaa AVS-säleikön mitattua ja vihreä laskennallista, 30 ja 35 dB:n äänitasoa B-liitännätavalla.

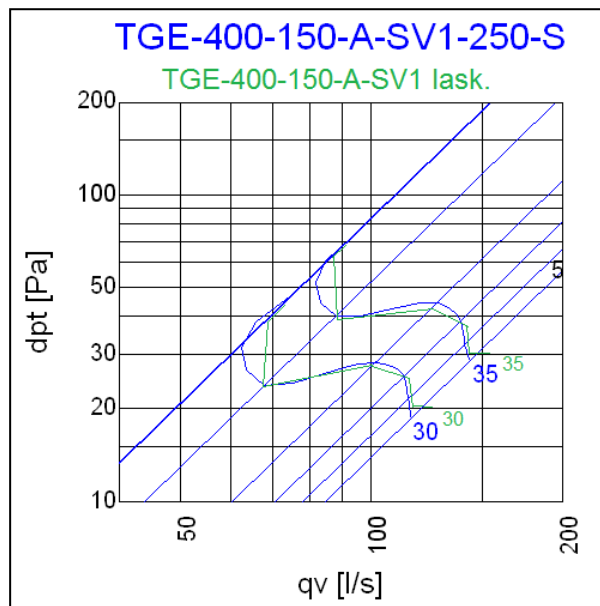
### 5.1.3 Laskentamallin onnistuminen

Äänenkehityksen laskentamallin tulokset on koottu liitteeseen 3. Yleisesti ottaen päätelaitteiden äänenkehityksen osalta laskentamalli osoittautui hyvinkin toimivaksi. Suurimmalla osalla tuloilmasäleiköistä laskennallinen äänenkehitys vastasi erittäin hyvin mitattuja arvoja. Kuitenkin osalla tuotteista laskennallisen ja mitatun äänenkehityksen välillä oli hieman eroavaisuutta etenkin pienimmillä säätöasennoilla. Poistoilmasäleiköillä eroavaisuutta oli eniten käytettäessä B-liitántätapaa, kun taas muilla liitántätavoilla laskentamallin tulokset vastasivat hyvin mitattuja arvoja.

Seuraavissa kuvissa (kuvat 22 ja 23) on esitetty vertailukäyrästöt mitattujen sekä laskennallisten äänenkehitysten välillä. Niissä molemmissa sininen käyrä kuvaa päätelaitteen mitattua ja vihreä laskennallista äänenkehitystä. Ensimmäisessä kuvassa on esimerkki tuotteesta, jossa laskentamallin avulla saatu päätelaitteen äänenkehitys vastasi hyvin mitattua arvoa. Esimerkissä vertailtiin TGE-400-150-A -tasauslaatikon sekä poistoilmasäleikön SV-1 laskennallista ja mitattua äänenkehitystä. Kyseisessä tilanteessa laskentamalli muodostettiin yhtälön 19 mukaisesti. Koska laskelma tehtiin A-liitántätavalle, on kyseisessä yhtälössä otettu huomioon ainoastaan säleikön korjaustermi  $K_{säl}$ .

$$L_{p10A,TGE-400-150-A-SV1} = L_{p10A,TGE-400-150-A} - (K_{liit} + K_{A-SV1}) \quad (19)$$

$L_{p10A,TGE-400-150-A-SV1}$	laskennallinen äänenkehitys A-liitännällä SV1-säleikölle ja ko. tasauslaatikolle säätöasennoittain, dB
$L_{p10A,TGE-400-150-A}$	pelkän tasauslaatikon mitattu äänenkehitys liitántätavalla A säätöasennoittain, dB
$K_{liit}$	liitántätavan korjaustermi = 0 dB
$K_{A-SV1}$	SV1-säleikön korjaustermi A-liitännällä säätöasennoittain, dB (liite 5)



**KUVA 22. Äänenkehityksen laskentamallin vertailu / onnistunut**

Edellisestä kuvasta (kuva 22) voidaan huomata, että laskennallinen äänitasokäyrä vastasi tässä tapauksessa hyvin mitaamalla saatuja ääniarvoja. Varsinkin säätöasennoitain äänitasokäyrät kohtasivat lähes täysin samoissa pisteissä. Laskennallinen vihreä vertailukäyrä on piirretty suoraan viivoin, jolloin se antaa vain kuvan siitä, missä pisteessä äänikäyrä on tietyllä säätöasennolla. Todellisuudessa kyseinen käyrä kulkee todennäköisesti samansuuntaisesti kuin mitaamalla saatu äänikäyrä.

Kuvassa 23 puolestaan on vertailuesimerkki tuotteesta, jonka laskennallinen äänitaso poikkesi huomattavan paljon mitatusta äänitasosta. Siinä laskentamallin onnistuneisuutta on tarkasteltu poistoilman tasauslaatikolla TGE-200-100-B sekä USR-säleiköllä. Kyseinen laskentamalli on muodostettu tässä tapauksessa yhtälön 20 tapaan.

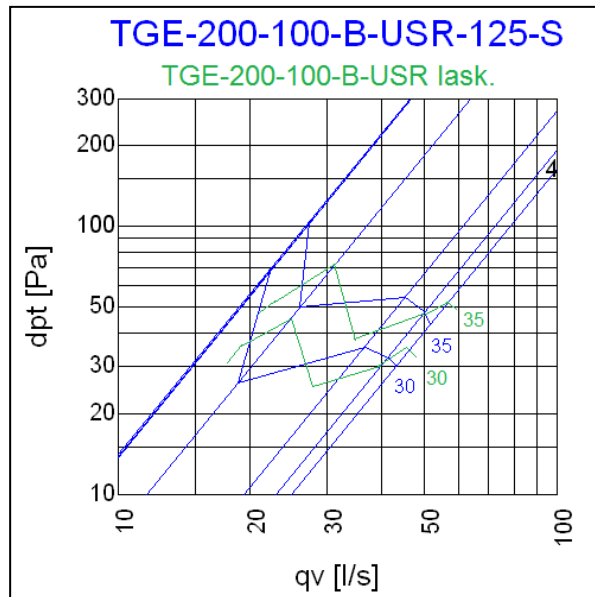
$$L_{p10A,TGE-200-100-B-USR} = L_{p10A,TGE-200-100-A} - (K_{TGE-B} + K_{B-USR}) \quad (20)$$

$L_{p10A,TGE-200-100-B-USR}$	laskennallinen äänenkehitys B-liitännätavalla ko. säleiköllelaatikko –yhdistelmälle säätöasennoitain, dB
$L_{p10A,TGE-200-100-A}$	mitattu äänenkehitys pelkälle tasauslaatikolle A-liitännätavalla säätöasennoitain, dB
$K_{TGE-B}$	korjaustermi TGE-tasauslaatikon B-liitännätavalle säätöasennoitain, dB (liite 5)



$K_{B-USR}$ 

korjaustermi USR- säleikölle ko. tasauslaatikon B-  
liitántätavalla säätöasennoinnain, dB (liite 5)



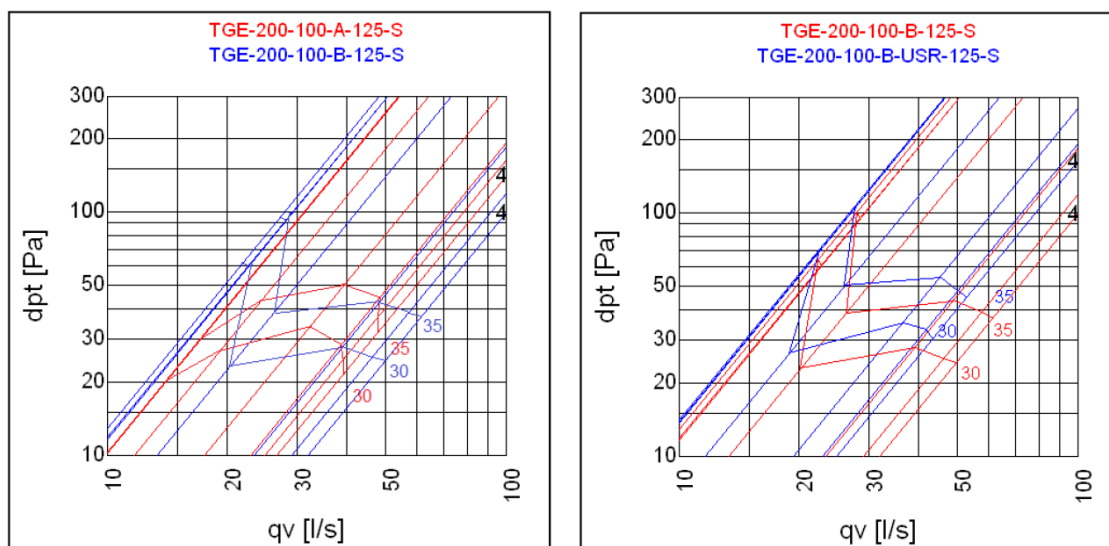
**KUVA 23. Äänenkehityksen laskentamallin vertailu / epäonnistunut**

Kuten edellä mainittiin, poistoilmapuolella laskentamallin avulla saadut äänenkehitykset eivät vastanneet kovin hyvin mitattuja arvoja B-liitántätavalla. Kyseisestä kuvasta voidaankin huomata, että laskennallisen ja mitatun äänenkehityksen välillä eroavaisuutta oli sekä säätöasentokohtaisilla arvoilla että myös käyrän suunnassa. Ainoastaan säätöasennolla 3 käyrät leikkasivat täysin samassa pisteessä.

Kummankin esimerkin mitatuissa käyrästäöissä pienimpien säätöasentojen (0, 0.2 ja 0.5) painekäyrät olivat täysin samassa kohdassa, jolloin näiden kohdalla ei saatu tehtyä tarkkaa vertailua mitatun ja laskennallisen käyrän välillä. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että näiden säätöasentojen välillä ei juuri ollut eroa niiden avausasentojen suuruudessa mittauksen aikana. Kyseisissä tapauksissa säätölaite on todennäköisesti ollut täysin kiinni jokaisella kolmella pienimmällä säätöasennolla. Kun taas mitattaessa säätöasennolla 1 ero edelliseen säätöasentoon on huomattavasti suurempi, jolloin säätölaite on selvästi lähtenyt avautumaan.

Kuvassa 24 on pelkän tasauslaatikon A- ja B-liitántätapojen sekä myös säleikkölaatikko -yhdistelmän ja pelkän laatikon välinen vertailukäyrästäö kyseisellä säleikkökoolla. Kuvasta voidaan havaita, että A-liitántätavalla tehdyssä mittauksessa kahden pienimmän (0 ja 0.2) säätöasennon painekäyrät ovat täysin samassa kohdassa, jolloin

voidaan olettaa, että säätölaitteen avausasento on ollut mittauksessa täysin kiinni. Ilmeisesti kyseisessä tapauksessa liitântätapa on kuitenkin vaikuttanut tuotteen painehäviöön lisäävästi, koska B-liitännällä mitattujen pelkän tasauslaatikon ja säleikkölaatikko -yhdistelmän painekäyrät eivät juuri eroa toisistaan pienimmällä säätöasennolla.



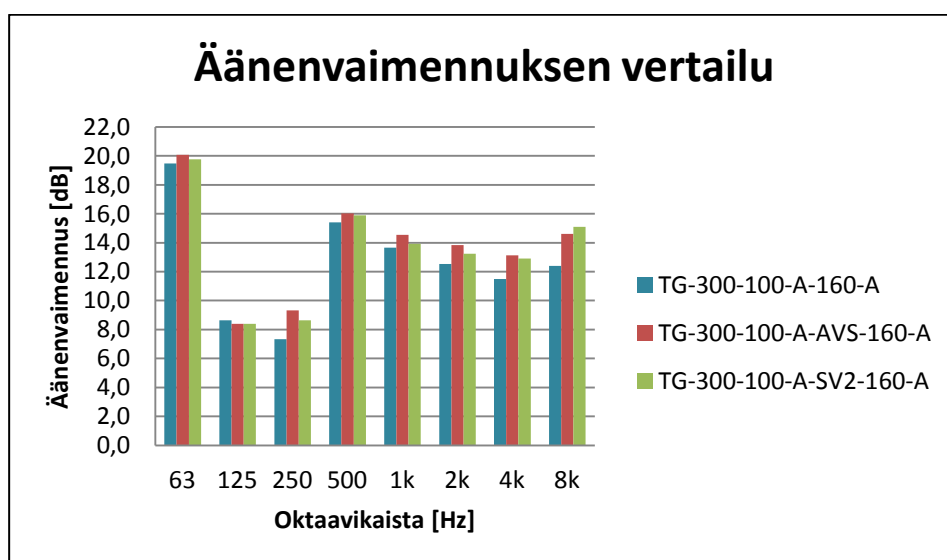
**KUVA 24. Vertailukäyrästöt**

Tarkasteltaessa kuvan 23 laskennallista käyrää suurimmalla säätöasennolla kyseinen käyrä menee mitatun painekäyrän yli. Tämä johtuu siitä, että kyseisen yhdistelmän painekäyrä on hieman ”ylempänä” kuin pelkän tasauslaatikon painekäyrä A-liitântätavalla (kuva 24). Yllä olevasta kuvasta voidaan myös todeta, että painekäyrät pelkän B-laatikon ja säleikkö-laatikko -yhdistelmän välillä eivät suurimmilla säätöasunnoilla kohtaa samoissa pisteissä kyseisen säleikön kuristaessa ilmavirtaa. Nämä ovat seikkoja, jotka saattoivat vaikuttaa laskennalliseen äänenkehitykseen. Jokaisella tutkimuksessa mukana olleella tuotteella eroavaisuudet sekä suurimmalla että pienimmällä avausasennolla laskennallisen ja mitatun äänitason välillä eivät kuitenkaan olleet merkittäviä, sillä kyseisten ilmavirtojen erot tietyllä painetasolla olivat korkeintaan noin 5 l/s.

## 5.2 Vaimennusmittaus

### 5.2.1 Tulosten käsittely

Mitatuista tasauslaatikoiden sekä säleikköjen äänenvaimennuksista laskettiin keskiarvot oktaavikaistoittain, ja nämä arvot kuvasivat kyseisten päätelaitteiden äänenvaimennuksia. Kyseisiä arvoja voitiin vertailla laatikoiden ja säleikköjen välillä, ja näiden vertailujen avulla tutkia äänenvaimennuksen käyttäytymistä eri tuotteilla. Kuvassa 25 on esimerkki edellä mainituista vertailuista, jossa sininen pylväs kuvaa pelkän tasauslaatikon (TG-300-100) äänenvaimennusta liitännätavalla A ja punainen sekä vihreä pylväs säleikköjen (AVS, SV2) äänenvaimennusta kyseisellä tasauslaatikolla.



**KUVA 25. Tasauslaatikon ja säleikköjen äänenvaimennusvertailu**

Kuvasta 25 nähdään, että äänenvaimennusarvot säleikköjen ja pelkän tasauslaatikon välillä eivät eroa kovinkaan merkittävästi. Pienimmällä kanavakooalla mitatuilla tulo- ja poistoilmapäätelaitteilla eroavaisuutta näiden välillä oli huomattavan paljon etenkin suurimmilla ( $\geq 2000$  Hz) taajuuskaistoilla. Tätä suuremmilla päätelaitteilla eroavaisuudet kyseisten äänenvaimennusten välillä olivat selkeästi vähäisemmät. Poistoilmapuolella eniten poikkesi 8000 Hz:n taajuuskaistalla mitatut äänenvaimennukset, joilla tasauslaatikon ja säleikön välinen ero oli korkeimmillaan noin 4 dB. Mutta, koska ko. tuotteiden äänenvaimennusarvot ilmoitetaan taajuuskaistoilla 125...4000 Hz, ei kyseistä poikkeamaa tarvitse tässä tutkimuksessa huomioida.

### 5.2.2 Laskentamallin kehittäminen

Päätelaitteen äänenvaimennusta koskevan laskentamallin muodostaminen tapahtui teoriassa samalla tavalla kuin äänenkehityksessäkin. Sen käyttötarkoitus ja periaate on myös täysin sama kuin edellisessä tapauksessa, ainoastaan korjaustermien määrittäminen tapahtui käytännössä hieman erilailla. Edellä mainittujen eroavaisuuksien ollessa yleisesti ottaen hyvin pienet pelkän tasauslaatikon ja säleikköjen välillä päätettiin ensin, että laskentamallia muodostaessa sekä tietylle laatikolle että siihen asennettaville säleiköille voitaisiin käyttää samaa, tasauslaatikon liitântätavan, korjaustermiä  $K_{liit}$ .

Ensimmäiseksi siis vertailtiin samankokoisten tasauslaatikoiden liitântätapoja keskenään ja laskettiin näiden välisten äänenvaimennusten eroavaisuudet. Kyseiset laskut tehtiin siis jälleen vain niille päätelaitteille, joista mittaukset oli tehty jokaista liitântätapaa kohden. Vertailut liitântätapojen välillä tehtiin samalla tavalla kuin äänenkehitystä tutkittaessa, eli B- ja C-liitântätapaa verrattiin A-liitântään. Poikkeuksena oli, että kyseiset vertailut tehtiin tässä tapauksessa oktaavikaistoittain.

Liitântätapojen eroavaisuuksista laskettiin keskiarvot oktaavikaistoittain, jolloin saatiin muodostettua korjaustermi  $K_{liit}$  tasauslaatikon B- ja C-liitântätavoille, joita käytettiin myös määritettäessä säleikön äänenvaimennusta kyseisillä liitântätavoilla. A-liitântätavalla säleikköjen äänenvaimennusarvoina käytettiin siis samoja arvoja, kuin pelkälle tasauslaatikolle. Oktaavikaistoittainen korjaustermi  $K_{liit}$  muodostettiin siis alla olevan yhtälön mukaisesti.

$$K_{liit} = \bar{x} = \frac{\sum(\Delta L_{B,C} - \Delta L_A)}{n_{tuote}} \quad (21)$$

$K_{liit}$	liitântätavan korjaustermi oktaavikaistoittain, dB
$\bar{x}$	keskiarvo oktaavikaistoittain, dB
$\Delta L_{B,C}$	äänenvaimennus tasauslaatikon B- tai C-liitântätavalla oktaavikaistoittain, dB
$\Delta L_A$	äänenvaimennus tasauslaatikon A-liitântätavalla oktaavikaistoittain, dB
$n_{tuote}$	tuotteiden lukumäärä B- tai C-liitännällä

Laskennallinen äänenvaimennus B- ja C-liitántätavoille saatiin siten, että kyseinen liitántätavan korjaustermi lisättiin aina A-liitántätavan vaimennusarvoon oktaavikaistoittain seuraavasti:

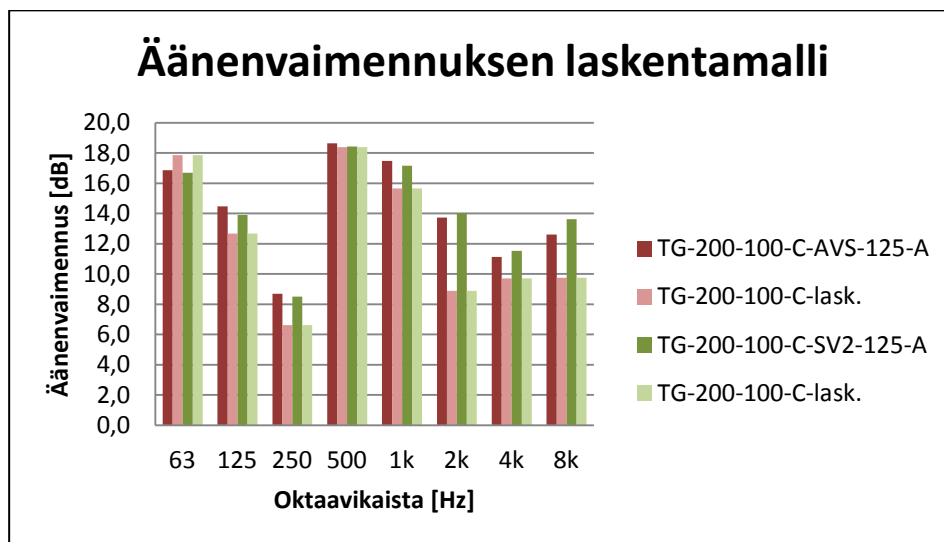
$$\Delta L_{B,C,lask} = \Delta L_A + K_{liit} \quad (22)$$

$\Delta L_{B,C,lask}$  laskennallinen äänenvaimennus tasauslaatikon B- tai C-liitántätavalla oktaavikaistoittain, dB

$\Delta L_A$  äänenvaimennus tasauslaatikon A-liitántätavalla oktaavikaistoittain, dB

$K_{liit}$  liitántätavan korjaustermi oktaavikaistoittain, dB (liite 5)

Kuvassa 26 on esimerkki, jossa on vertailtu laskentamallin onnistumista käyttämällä vain yhtä, liitántätavan, korjaustermiä  $K_{liit}$ . Siinä kyseisen termien avulla laskettiin tasauslaatikolle TG-200-100 ns. uudet äänenvaimennusarvot C-liitántätavalla, ja näitä arvoja käytettiin myös AVS- ja SV2-säleiköille. Kuvassa tummanpunainen ja tummanvihreä pylväs kuvaa ko. säleikön mitattua äänenvaimennusta ja vaaleat pylväät laskettua äänenvaimennusta C-liitántätavalla.



**KUVA 26. Äänenvaimennuksen laskentamallin vertailu käyttäen vain liitántätavan korjaustermiä**

Kyseisestä vertailukuvasta voidaan todeta, että laskennallisen ja mitatun äänenvaimennuksen välillä oli jonkin verran eroavaisuutta lähes jokaisella oktaavikaistalla. Etenkin 2000 Hz:n taajuuskaistalla eroa kyseisten arvojen välillä oli huomattavasti enemmän kuin muilla kaistoilla. Sama pätee myös muiden tuotteiden laskennallisiin

äänenvaimennusarvoihin. Lisäksi poistoilmatuotteella TGE-400-150 eroavaisuutta muihin kaistoihin nähden oli eniten myös taajuuskaistoilla 500...8000 Hz.

Koska päätelaitteiden laskennalliset äänenvaimennusarvot poikkesivat merkittävästi mitatuista arvoista käyttämällä laskentamallissa vain liitántätavan korjaustermiä, päätettiin myös säleiköille muodostaa omat korjaustermit  $K_{säl}$ . Näin ollen saatiin siis samanlaiset korjaustermit kuin äänenkehityslaskennassakin. Ensimmäisenä laskettiin, kuinka paljon kunkin säleikkö-laatikko -yhdistelmän äänenvaimennus poikkesi pelkän tasauslaatikon äänenvaimennuksesta samalla liitántätavalla. Tämän jälkeen jokaisen yhdistelmän ja pelkän laatikon eroavaisuuksista tietyllä liitántätavalla laskettiin keskiarvot oktaavikaistoittain, jolloin kullekin säleikölle saatiin muodostettua oktaavikaistoittaiset korjaustermit. Säleikön korjaustermi  $K_{säl}$  muodostettiin yhtälön 23 mukaisesti.

$$K_{säl} = \frac{\sum(\Delta L_{säl} - \Delta L_{laat})}{n_{tuote}} \quad (23)$$

$K_{säl}$	säleikön korjaustermi oktaavikaistoittain, dB
$\Delta L_{säl}$	säleikkö-laatikko –yhdistelmän äänenvaimennus oktaavikaistoittain, dB
$\Delta L_{laat}$	pelkän ko. tasauslaatikon äänenvaimennus oktaavikaistoittain, dB
$n_{tuote}$	tuotteiden lukumäärä ko. säleiköllä ja tasauslaatikon liitántätavalla

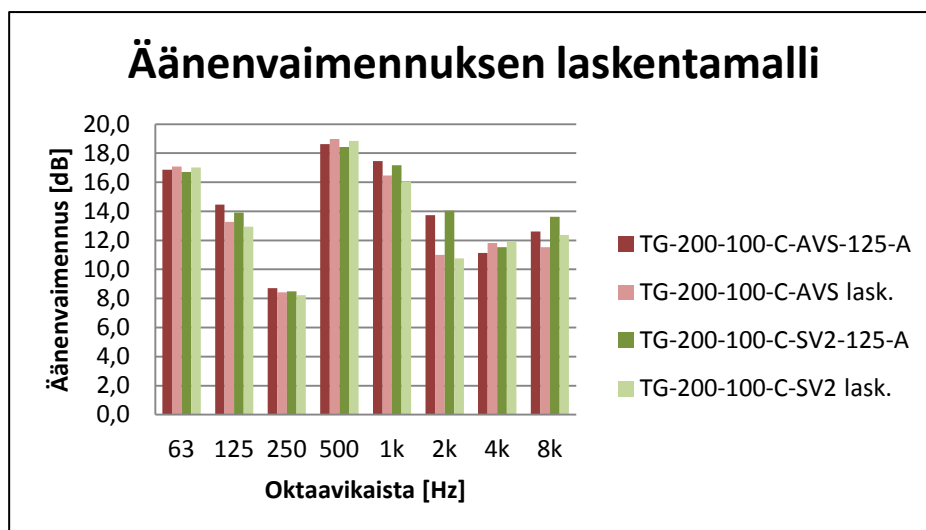
Näin ollen voitiin laskentamalli määrittää seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$\Delta L_{säl,lask} = \Delta L_A + K_{liit} + K_{säl} \quad (24)$$

$\Delta L_{säl,lask}$	säleikkö-laatikko -yhdistelmän laskennallinen äänenvaimennus oktaavikaistoittain, dB
$\Delta L_A$	pelkän tasauslaatikon äänenvaimennus A-liitännällä oktaavikaistoittain, dB
$K_{liit}$	liitántätavan korjaustermi oktaavikaistoittain, dB (liite 5)
$K_{säl}$	ko. säleikön korjaustermi oktaavikaistoittain, dB (liite 5)

Seuraavassa kuvassa (kuva 27) on vertailtu uuden laskentamallin onnistumista samalla tuotteella kuin edellisessä esimerkissä, jossa laskentamalli oli muodostettu käyttäen

vain liitántätävän korjaustermiä. Vertailukuvassa tummanpunainen sekä tummanvihreä pylväs kuvaa säleikköjen mitattua äänenvaimennusta ja vaaleat pylväät niiden laskennallista äänenvaimennusta.



**KUVA 27. Äänenvaimennuksen laskentamallin vertailu käyttäen sekä liitántätävän että säleikön korjaustermiä**

Näiden kahden vertailun välillä voitiin havaita, että käyttämällä myös säleikölle omaa korjaustermiä  $K_{säl}$  laskennalliset äänenvaimennusarvot kyseisellä tuotteella olivat lähempänä mitattuja vaimennusarvoja. Taajuuskaistalla 2000 Hz eroavaisuutta mitattujen ja laskennallisten äänenvaimennusten välillä oli edelleen enemmän kuin muilla taajuuskaistoilla. Jälkimmäisessä vertailussa kuitenkin esimerkiksi SV2-säleiköllä eroa näiden arvojen välillä oli noin 3 dB, kun taas aikaisemmassa esimerkissä eroavaisuus oli jopa 5 dB.

### 5.2.3 Laskentamallin onnistuminen

Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset on koottu liitteeseen 4. Kyseisten pääte-laitteiden äänenvaimennuksen määrittäminen laskentamallin avulla onnistui osalle tuotteista hyvin. Lähes kaikkien vertailtavien tuotteiden kohdalla eroavaisuutta oli kuitenkin aina osalla taajuuskaistoista. A- ja C-liitántätavoilla laskentamallin todentaminen onnistui parhaiten, kun taas B-liitännällä sekä tulo- että poistoilmasäleiköillä eroavaisuutta mitatun ja laskennallisen äänenvaimennuksen välillä oli huomattavasti enemmän.

Seuraavaksi on esitelty kaksi esimerkkiä (kuvat 28 ja 29) tuotteiden äänenvaimennuksen laskentamallin todentamisesta. Kuvassa 28 on tarkasteltu tuotetta, jonka laskennalliset äänenvaimennukset vastasivat lähes täysin mitattuja äänenvaimennusarvoja, ja toisessa tuotetta, jonka vaimennusarvojen välillä poikkeamaa oli eniten. Siinä vertailu on tehty laskennallisen ja mitatun äänenvaimennuksen välillä tuloilmasäleiköille TG-300-100-A –tasauslaatikolla. Koska kyseinen vertailu on tehty A-liitännätavalle, laskentamallissa on käytetty ainoastaan säleiköille omia korjaustermejä  $K_{säl}$ . Kyseisen esimerkin laskentamalli on muodostettu yhtälön 25 mukaisesti.

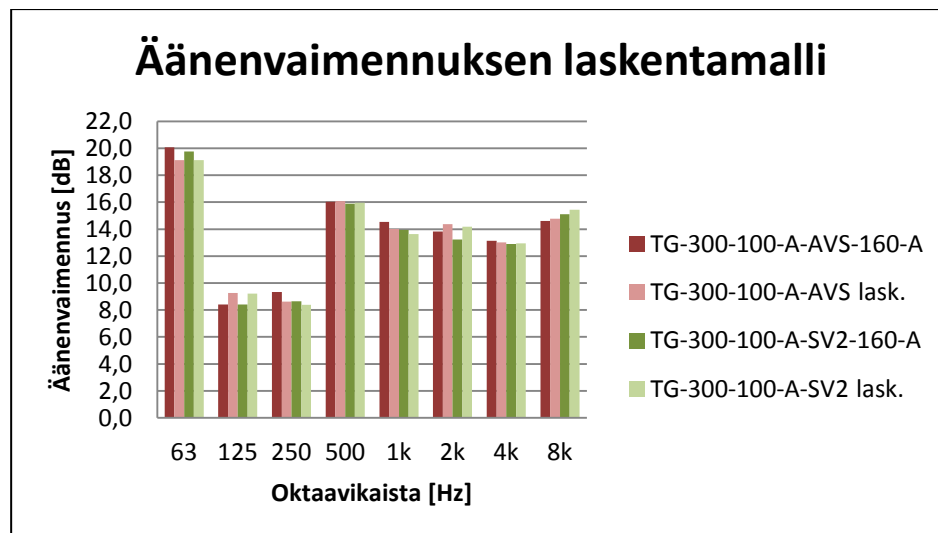
$$\Delta L_{TG-300-100-A-AVS,SV2} = \Delta L_{TG-300-100-A} + K_{liit} + K_{A-AVS,SV2} \quad (25)$$

$\Delta L_{TG-300-100-A-AVS,SV2}$  laskennallinen äänenvaimennus AVS- ja SV2-säleiköille kyseisellä tasauslaatikolla oktaavikaistoittain, dB

$\Delta L_{TG-300-100-A}$  mitattu äänenvaimennus pelkälle tasauslaatikolle A-liitännällä oktaavikaistoittain, dB

$K_{liit}$  liitännätavan korjaustermi oktaavikaistoittain = 0 dB

$K_{A-AVS,SV2}$  korjaustermi AVS- ja SV2-säleiköille A-liitännällä oktaavikaistoittain, dB (liite 5)



**KUVA 28. Äänenvaimennuksen laskentamallin vertailu / onnistunut**

Edellisestä kuvasta voidaan todeta, että eroavaisuudet laskennallisen ja mitatun äänenvaimennuksen välillä oli jokaisella kaistalla korkeintaan 1 dB. Muita tuotteita, joilla suurimmalla osalla taajuuskaistoista vaimennusarvojen välinen ero jäi alle yhden desibelin, oli lähes kaikki A- ja C-liitännällä mitatut säleikköjen ja tasauslaatikkojen



yhdistelmät. Näillä tuotteilla suurimmat eroavaisuudet olivat taajuuskaistoilla 1000...8000 Hz.

Niin kuin aikaisemmin todettiin, tasauslaatikon B-liitännällä mitattujen sekä laskennallisten vaimennusarvojen väliset eroavaisuudet olivat selkeästi suuremmat kuin muilla liitännätavoilla. Seuraavaksi on esimerkki tuotteesta (kuva 29), jossa laskentamallin avulla saadut vaimennusarvot poikkesivat eniten mitatuista arvoista. Tarkasteltavana tuotteena on siis TGE-400-150 –tasauslaatikko B-liitännällä sekä molemmat poistoilmasäleiköt. Kyseisessä esimerkissä päätelaitteiden laskennalliset äänenvaimennukset  $\Delta L_{säl,lask}$  on laskettu yhtälön 26 avulla.

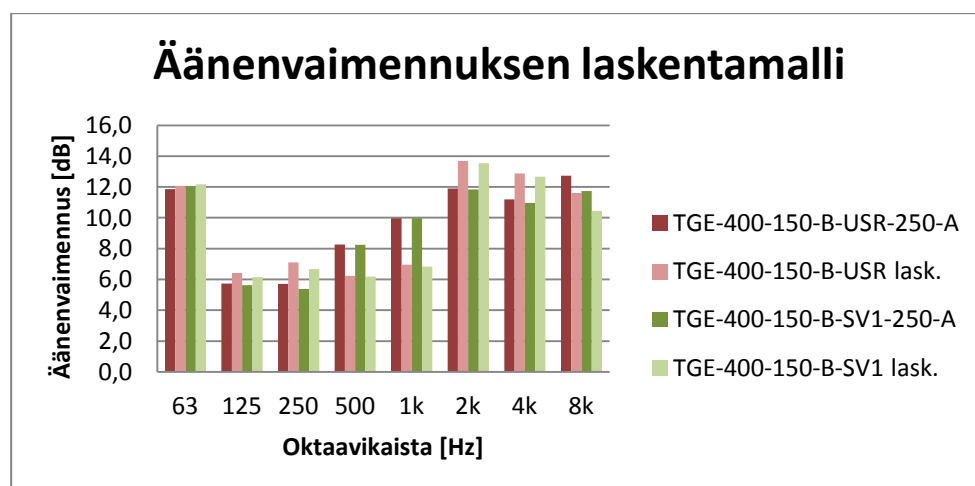
$$\Delta L_{TGE-400-150-B-USR,SV1} = \Delta L_{TGE-400-150-A} + K_{TGE-B} + K_{B-USR,SV1} \quad (26)$$

$\Delta L_{TGE-400-150-B-USR,SV1}$  laskennallinen äänenvaimennus USR- ja SV1-säleiköille ko. tasauslaatikon B-liitännällä oktaavikaistoittain, dB

$\Delta L_{TGE-400-150-A}$  mitattu äänenvaimennus pelkälle tasauslaatikolle A-liitännällä oktaavikaistoittain, dB

$K_{TGE-B}$  korjaustermi B-liitännätavalle oktaavikaistoittain, dB (liite 5)

$K_{B-USR,SV1}$  korjaustermit USR- ja SV1-säleiköille B-liitännällä oktaavikaistoittain, dB (liite 5)



**KUVA 29. Äänenvaimennuksen laskentamallin vertailu / epäonnistunut**

Käytettäessä tasauslaatikon B-liitännätapaa lähes jokaisella tuotteella kyseiset vaimennusarvojen eroavaisuudet olivat liki samansuuruisia kullakin taajuuskaistalla kuin yllä

olevassa kuvassa. Tuloilmasäleiköillä kyseisellä liitántätavalla eroavaisuutta oli korkeimmillaan liki 4 dB, ja suurimmat erot olivat taajuuskaistoilla 2000 Hz ja 8000 Hz. Poistoilmasäleiköillä sen sijaan suurin vaimennusarvojen ero oli alhaisempi, noin 3,5 dB, ja suurimmat erot olivat suurimmaksi osakseen taajuuskaistoilla 1000...2000 Hz. Käytettäessä B-liitántää pienimpiä ( $\leq 1$  dB) poikkeamia vaimennusarvojen välillä oli vain muutamilla taajuuskaistoilla sekä tulo- että poistoilmasäleiköillä. Tästä poiketen A- ja C-liitännällä saadut laskennalliset äänenvaimennusarvot olivat yleisesti ottaen lähempänä mitattuja arvoja. Keskimääräisesti parhaimmat laskennalliset tulokset kaikilla tutkimuksessa mukana olleilla tuotteilla saatiin pienimmillä ja keskimmaisilla taajuuskaistoilla.

## 6 POHDINTA

Ilmanvaihdon päätelaitteiden äänenkehitys- ja vaimennusmittauksia tehtiin tulo- ja poistoilmasäleiköille sekä näihin kuuluville tasauslaatikoille. Kyseiset tuotteet valittiin tutkittavaan tuoteryhmään sen mukaan, mitkä ovat olleet keskimääräisesti myydyimpiä tuotteita. Jokaisella liitántätavalla mitattuja tuotteita tässä tutkimuksessa oli yhteensä ainoastaan neljälle eri säleikkökoolle. Tuloilmapuolella kyseiset tuotteet mitattiin pienimmille ( $\varnothing 125$ ,  $\varnothing 160$ ) kanaville. Laskentamallin yleistämiseen liittyen tutkimuksessa olisi voinut olla jokaisella liitännällä mitattavia tuotteita myös suuremmalla kanavakoolla, jolloin laskentamallin onnistumista oltaisi voitu vertailla hieman laajemmin. Sen sijaan poistoilmasäleiköillä laskentamallia voitiin testata kanavakoolla  $\varnothing 125$  sekä  $\varnothing 250$ , jolloin pystyttiin paremmin huomioimaan mahdolliset kanavakoon suuruuden vaihtelusta johtuvat eroavaisuudet laskentamallien todentamisessa.

Valitessa tutkimukseen otettavia tuotteita ei vielä tarkkaan tiedetty, millä tavalla laskentamalli tulisi muodostaa, eikä sitä, että sen pohjana tultaisiin käyttämään tasauslaatikon A-liitántätapaa. Jotta laskentamallin toimivuutta olisi voitu testata vielä laajemmin, olisi mittauksia tasauslaatikon A-liitántätavalla voitu tehdä jokaisella tutkimuksessa mukana olleella säleikkökoolla.

Tuloksista voitiin myös päätellä, että sekä säleikköjen äänenkehityksen että vaimennuksen laskennalliset arvot poikkesivat eniten mitatuista arvoista käytettäessä tasauslaatikon B-liitántätapaa. Tämä johtuu todennäköisesti muun muassa siitä, että B-

liitántätavalle äänenkehitysmittauksia suoritettiin vähiten, jolloin myös äänenkehityksen ja vaimennuksen keskiarvoista lasketut korjaustermit eivät anna kovin tarkkaa kuvaa tuotteesta, jos lähtöarvojen välillä on ollut erityisen paljon poikkeamaa. Jotta laskentamallin toimivuutta saataisiin parannettua myös B-liitännälle, tulisi tuotteita mitata enemmän kyseisellä liitántätavalla. Tällöin keskiarvot koostuisivat useammasta arvosta, ja korjaustermit voitaisiin luotettavammin yleistää kaikille tuotteille ja tuloksistakin tulisi todennäköisesti tarkempia. B-liitännän tasauslaatikossa liitántäkauluksen sijainti on suoraan vastapäätä säleikköä, kun taas muilla liitántätavoilla se on säleikön sivuilla (kuva 6). Myös siis itse liitännän suunta saattoi olla yksi syy siihen, että B-liitántätavalla saadut tulokset erosivat muiden liitántätapojen tuloksista.

Aikaisemmin tehdyn oletuksen mukaan sekä yhdistelmille että pelkille laatikoille käytettiin samoja painekäyriä äänenkehityksen laskentamallia muodostaessa. Koska näiden välillä kuitenkin oli pientä eroavaisuutta joillain säätöasunnoilla, tämä saattoi hieman vaikuttaa yhdistelmien laskennallisen äänitason tulokseen. Lisäksi äänenkehitystä mitattaessa osalla tuotteista esiintyi kokonaisäänitasokuvaajan painekäyrissä päällekkäisyyttä pienimmillä säätöasunnoilla, jolloin niiden kohdalla säätölaitteen avausasento on todennäköisesti ollut sama jokaisella mittauskerralla. Tarkemmin sanottuna säätölaitteen avausasento onkin ollut täysin kiinni jo esimerkiksi säätöasennolla 0,5, jolloin kahden pienemmän säätöasennon painekäyrät osuvat samaan kohtaan.

Tuloksia tarkasteltaessa tämä ei yleisesti ottaen kovin merkittävästi vaikuttanut laskentamallin muodostamiseen. Liitteen 3 tuloksista voidaan kuitenkin havaita, että osalla tuotteista laskennallisten käyrien pisteet pienimmällä ja/tai suurimmalla säätöasennolla eivät osu kyseisen tuotteen painekäyrälle, jolloin tämä tarkoittaa, että laskennallinen säätöalue on eri kuin mitattu. Eroavaisuudet painekäyrissä saattavat johtua muun muassa säleikön ja liitántätavan aiheuttamasta painehäviöstä. Esimerkiksi käytettäessä pienimpiä mittakanavia sekä tulo- että poistopuolella A-liitännän painekäyrissä ei ole lainkaan päällekkäisyyttä, mutta säleiköt kuristavat todennäköisesti ilmavirtaa niin, että tämä vaikuttaa yhdistelmien laskennallisiin äänikäyriin kyseisillä tasauslaatikoilla. Sen sijaan poistopuolella mitattaessa suuremmalla kanavakoolla ( $\varnothing 250$ ) säleikkö ei enää kasvata tuotteen painehäviötä, jolloin laskennallinen äänikäyrä osuu huomattavasti lähemmäksi mitattua painekäyrää etenkin pienimmällä säätöasennolla.

Laskennalliset äänitasot B- ja C-liitántätavoille saatiin sijoittamalla korjaustermeistä saadut pisteet A-laatikon kokonaisäänitasokäyrään ja siirtämällä kyseiset pisteet joko B- tai C-liitántätavalla mitatun yhdistelmän kuvaajaan. Joidenkin tuotteiden kohdalla on saattanut käydä myös niin, että tästä aiheutui virhettä B- ja C-liitántätapojen laskennallisiin äänitasoihin, mikäli pelkän A-laatikon mittauksessa säätölaitteen avausasento ei ole ollutkaan täysin kiinni pienimmällä säätöasennolla. Tämä pienentää kyseisen laatikon painehäviötä ja siten siirtää laskennallisen äänikäyrän pisteitä pienimmällä säätöasennolla alaspäin. Mikäli laskentamallia haluttaisiin jatkossa kehittää vielä tarkemmaksi, voitaisiin tasauslaatikoiden A-liitántätavoille tehdä tarkistusmittauksia koskien pienimpiä säätöasentoja, jolloin varmistuttaisiin niiden toiminta-alueesta.

Päätelaitteiden äänenvaimennuksen osalta laskentamallin kehittäminen onnistui hyvin A- ja C-liitántätavoille. Etenkin A-liitännällä laskennalliset äänenvaimennusarvot olivat lähempänä mitattuja arvoja kuin C-liitännällä. Suurimmat eroavaisuudet molemmilla liitántätavoilla oli suurimmilla taajuuskaistoilla, jotka eivät käytännön kannalta ole niin merkittäviä. Mikäli pienemmillä taajuuskaistoilla (125...500 Hz) oli eroavaisuutta, laskennallinen äänenvaimennus oli keskimääräisesti alhaisempi kuin mitattu vaimennusarvo. Tällöin virhe ei ole niin suuri, jos tuotteen äänenvaimennuskyky onkin parempi, kuin laskennallinen tulos. Tämä pätee myös osalle B-liitännällä tehtyihin laskentamallien vertailuihin, mutta eroavaisuudet vaimennusarvojen välillä ovat kuitenkin huomattavasti suuremmat, jolloin voitaisiin suositella aikaisemmin mainittuja lisämittauksia kyseiselle liitántätavalle, ja laskee näistä saaduista tuloksista uudet B-liitännän korjaustermit.

Myös äänenkehityksen laskentamallin muodostaminen onnistui yleisesti ottaen erittäin hyvin kyseisille A- ja C-liitántätavoille. Vaikka mittauksissa sekä tuloksissa huomattiin joitain edellä mainittuja puutteita tai virheitä, voitaisiin silti olettaa, että kyseistä laskentamallia voitaisiin käyttää jatkossa tutkimuksessa olevien tuotteiden äänikäyrästöjen laskemiseen. Tämä oletus perustuu yleisesti ottaen vähäisiin eroavaisuuksiin mitattujen ja laskennallisten äänikäyrien välillä sekä siihen, että kyseisten tuotteiden kokonaisäänitasokäyrät ilmoitetaan tuote-esitteissä hieman suoraviivaisemmin, jolloin sen avulla kyseisiä eroavaisuuksia voidaan jonkin verran kompensoida.

## LÄHTEET

1. Halme, Alpo & Seppänen, Olli. Ilmastoinnin äänitekniikka. Suomen LVI-liitto 2002
2. RIL 243-1-2007. Rakennusten akustinen suunnittelu, akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2007
3. Fläkt Woods Oy. Tekninen käsikirja: Ilmankäsittelykoneet 2010
4. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa C1, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Ympäristöministeriö 1998
5. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö 2003
6. SFS-EN-ISO 3741-2010
7. SFS-EN-ISO 5135-1997
8. Fläkt Woods Oy 2012. Yrityksen WWW-sivut. <http://www.flaktwoods.fi/> Päivitetty 12.3.2012. Luettu 12.3.2012
9. Fläkt Woods Oy 1994. Ohje: Päätelaitteiden äänitekniset mittaukset

Tuloilma:

Kanavakoko	Tasauslaatikko	Säleikkö	Äänenkehitys	Äänenvaimennus
125	TG-200-100-A			
	TG-200-100-A	SV-2-200-100		
	TG-200-100-A	AVS-200-100		
	TG-200-100-B			
	TG-200-100-B	SV-2-200-100		
	TG-200-100-B	AVS-200-100		
	TG-200-100-C			
	TG-200-100-C	SV-2-200-100		
	TG-200-100-C	AVS-200-100		
160	TG-300-100-A			
	TG-300-100-A	SV-2-300-100		
	TG-300-100-A	AVS-300-100		
	TG-300-100-B			
	TG-300-100-B	SV-2-300-100		
	TG-300-100-B	AVS-300-100		
	TG-300-100-C			
	TG-300-100-C	SV-2-300-100		
	TG-300-100-C	AVS-300-100		
200	TG-300-150-B			
	TG-300-150-B	SV-2-300-150		
	TG-300-150-B	AVS-300-150		
	TG-500-100-A			
	TG-500-100-A	SV-2-500-100		
	TG-500-100-A	AVS-500-100		
250	TG-400-150-C			
	TG-400-150-C	SV-2-400-150		
	TG-400-150-C	AVS-400-150		
	TG-500-150-A			
	TG-500-150-A	SV-2-500-150		
	TG-500-150-A	AVS-500-150		
315	TG-500-200-B			
	TG-500-200-B	SV-2-500-200		
	TG-500-200-B	AVS-500-200		
	TG-800-200-A			
	TG-800-200-A	SV-2-800-200		
	TG-800-200-A	AVS-800-200		

Poistoilma:

Kanavakoko	Tasauslaatikko	Säleikkö	Äänenkehitys	Äänenvaimennus
125	TGE-200-100-A			
	TGE-200-100-A	SV-1-200-100		
	TGE-200-100-A	USR-200-100		
	TGE-200-100-B			
	TGE-200-100-B	SV-1-200-100		
	TGE-200-100-B	USR-200-100		
	TGE-200-100-C			
	TGE-200-100-C	SV-1-200-100		
	TGE-200-100-C	USR-200-100		
160	TGE-300-100-C			
	TGE-300-100-C	SV-1-300-100		
	TGE-300-100-C	USR-300-100		
	TGE-400-100-A			
	TGE-400-100-A	SV-1-400-100		
	TGE-400-100-A	USR-400-100		
200	TGE-300-150-A			
	TGE-300-150-A	SV-1-300-150		
	TGE-300-150-A	USR-300-150		
	TGE-500-100-C			
	TGE-500-100-C	SV-1-500-100		
	TGE-500-100-C	USR-500-100		
250	TGE-400-150-A			
	TGE-400-150-A	SV-1-400-150		
	TGE-400-150-A	USR-400-150		
	TGE-400-150-B			
	TGE-400-150-B	SV-1-400-150		
	TGE-400-150-B	USR-400-150		
	TGE-400-150-C			
	TGE-400-150-C	SV-1-400-150		
	TGE-400-150-C	USR-400-150		
	TGE-400-200-A			
	TGE-400-200-A	SV-1-400-200		
	TGE-400-200-A	USR-400-200		
315	TGE-600-200-B			
	TGE-600-200-B	SV-1-600-200		
	TGE-600-200-B	USR-600-200		
	TGE-800-200-A			
	TGE-800-200-A	SV-1-800-200		
	TGE-800-200-A	USR-800-200		

## Fläkt Woods Oy

[illegible]



Esimerkki päätelaitteen mittauspöytäkirjasta

ÄÄNENVAIMENNUKSEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Fläkt Woods Oy

Tuote: TG-200-100-A-125-A  
 Mittauskanavan koko: 125  
 Tyyppi: Tuloilmalaite  
 Asennus: Seinä  
 Huoneilman lämpötila: 22  
 Ilmanpaine (mbar): 1018  
 Kosteus (%): 16

Mittaja: Sanna  
 Mittauspäivämäärä: 18.1.2012  
 Kalibrointipäivämäärä: 18.1.2012

Lisätiedot:

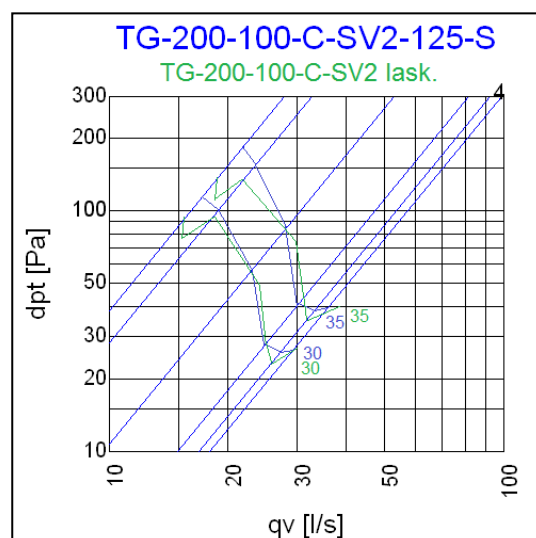
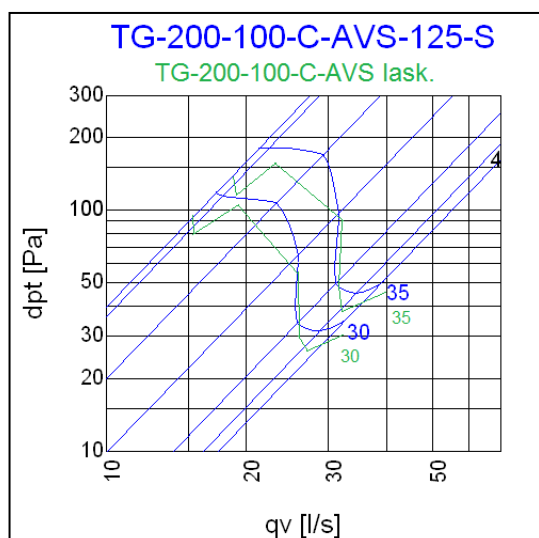
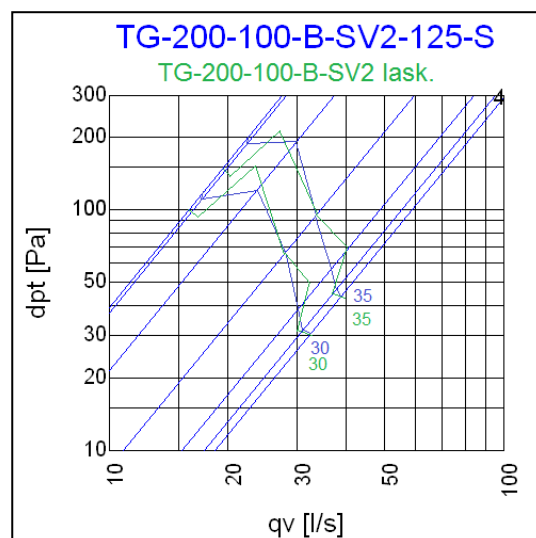
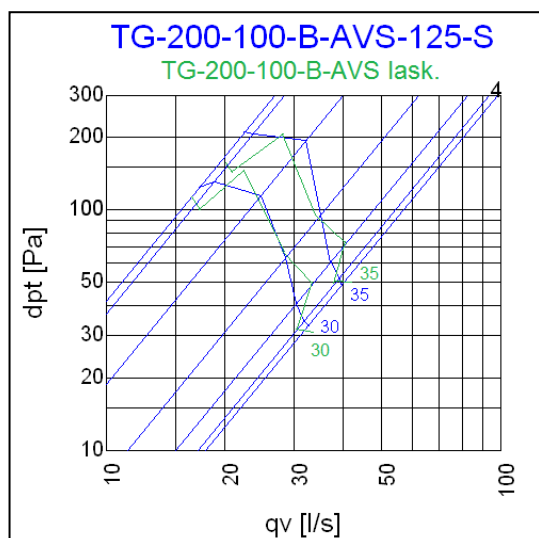
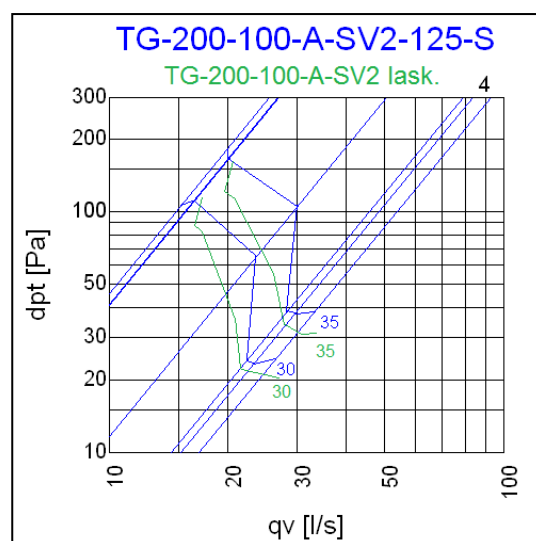
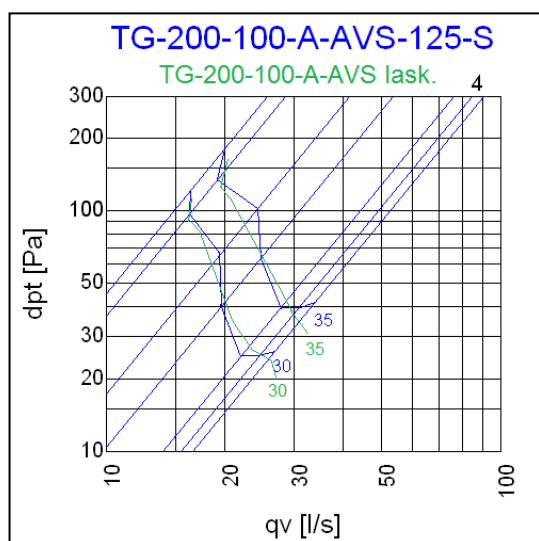
Pohjaäänitaso oktaavikaistoilla

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
	60,3	65,5	67,3	74,1	75,3	63,7	59,8	44	

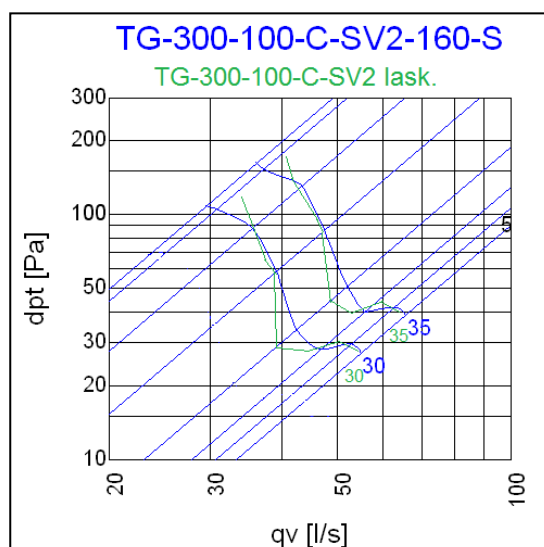
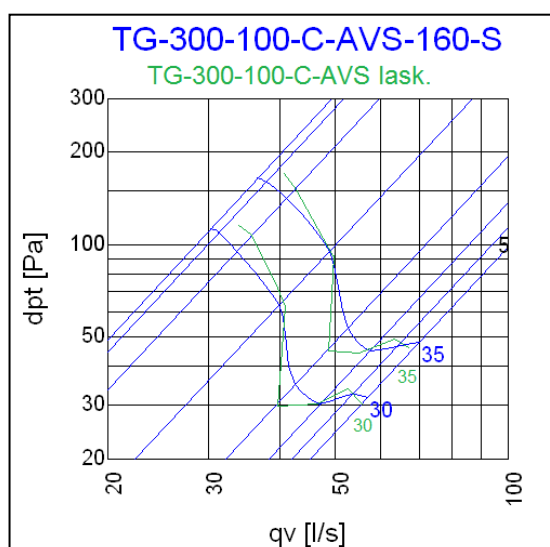
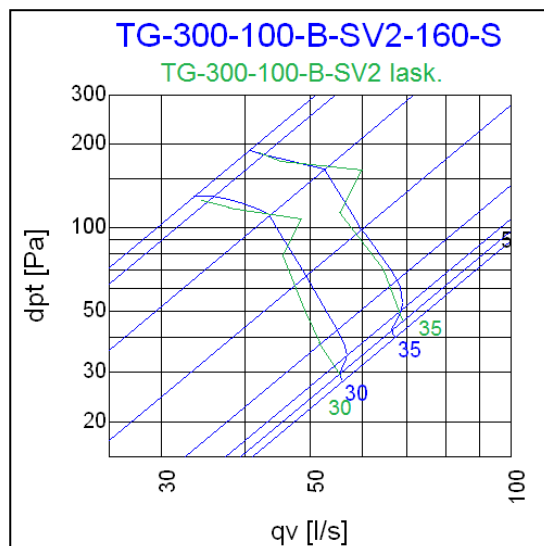
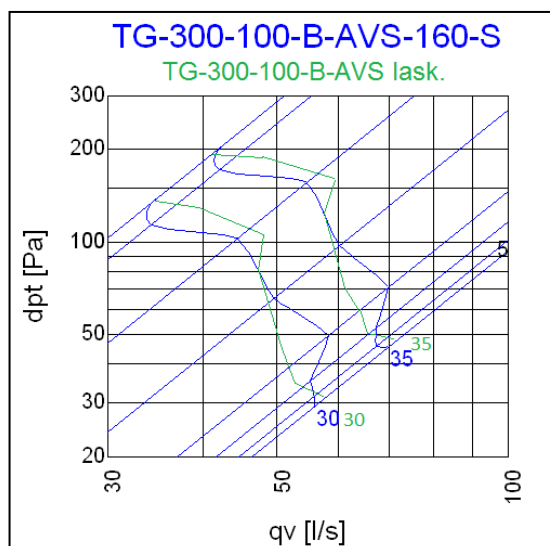
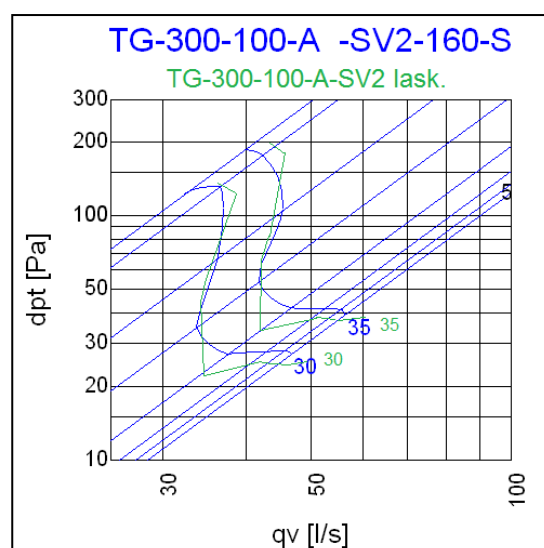
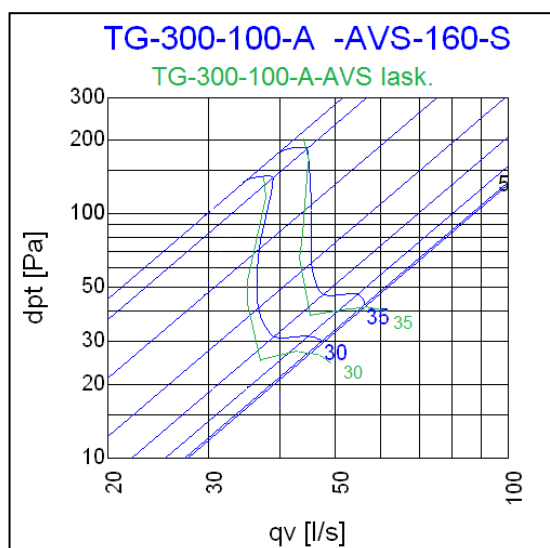
Äänenvaimennus oktaavikaistoittain. Ilman pääteheijastusta/pääteheijastuksen kanssa.

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Säätöasento
	-1,8	-2,2	-1,7	12,3	12,3	10,1	11,6	8,9	4
	17,9	11,8	6,8	16,2	13,7	10,5	11,7	9	
	-1,8	-2,1	-1,7	12,3	12,4	10,1	11,6	8,9	4
	18	11,8	6,8	16,3	13,8	10,5	11,7	8,9	
	-1,8	-2,2	-1,7	12,3	12,4	10,1	11,5	8,9	4
	18	11,8	6,8	16,3	13,8	10,5	11,6	8,9	

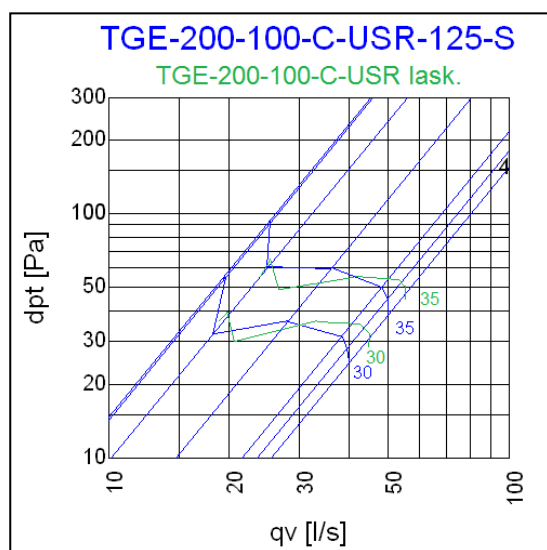
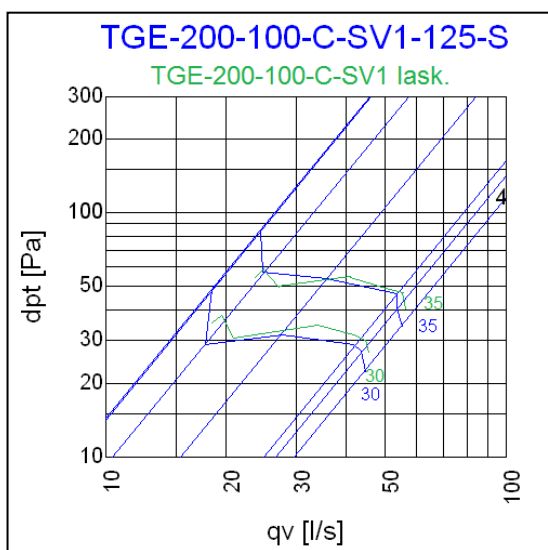
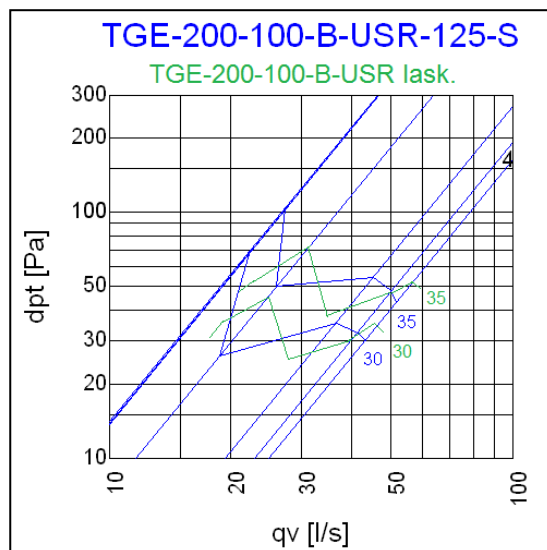
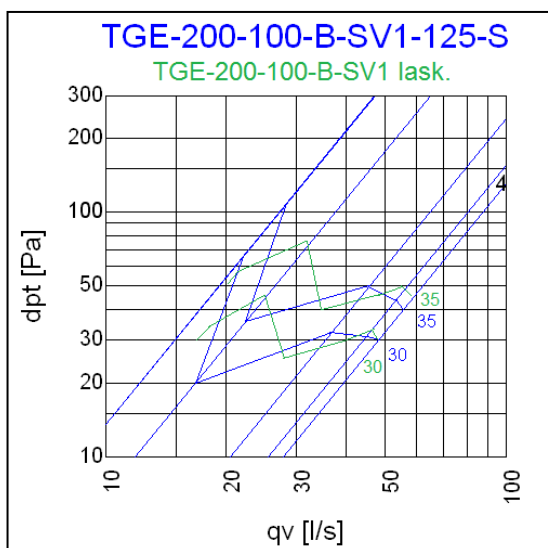
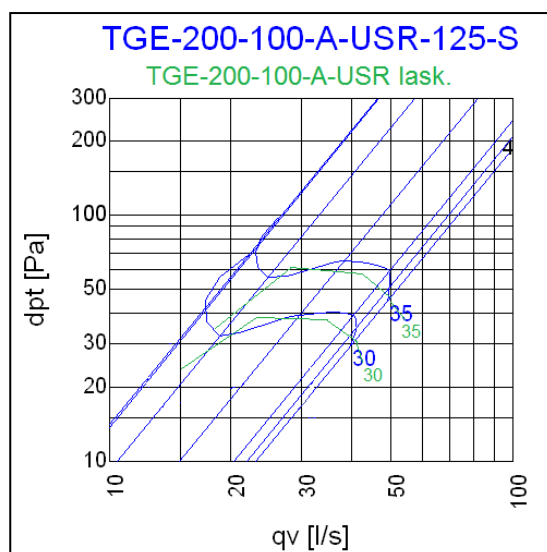
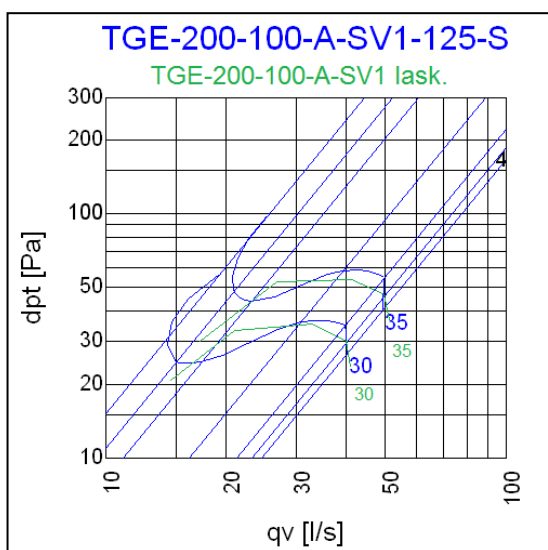
## Äänenkehityksen laskentamallin tulokset



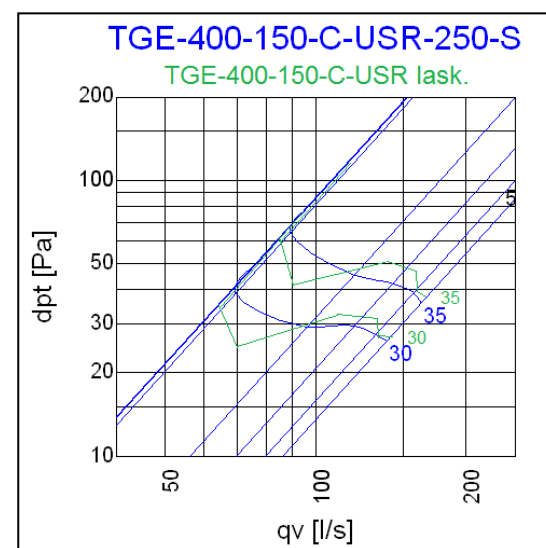
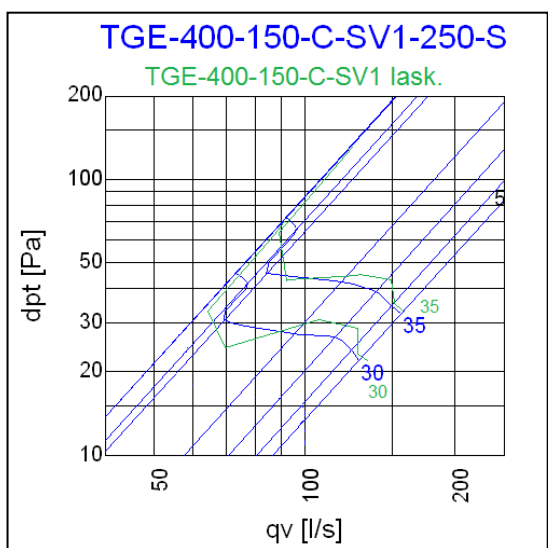
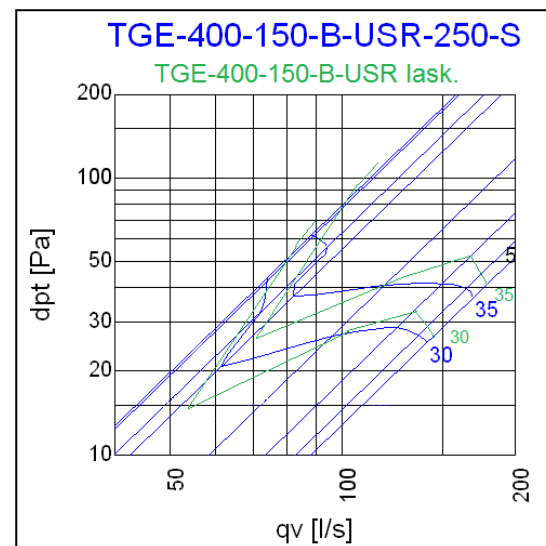
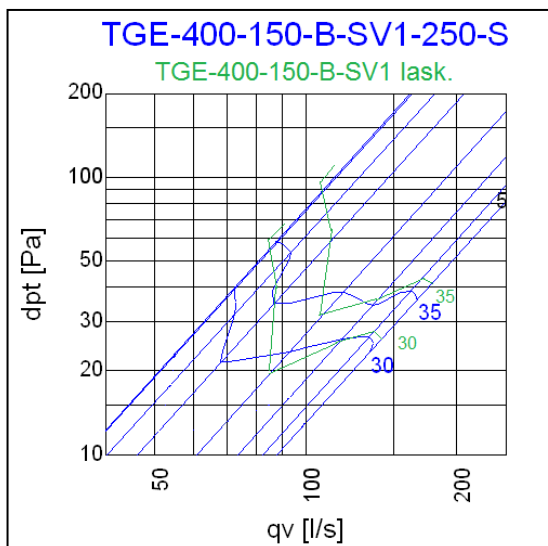
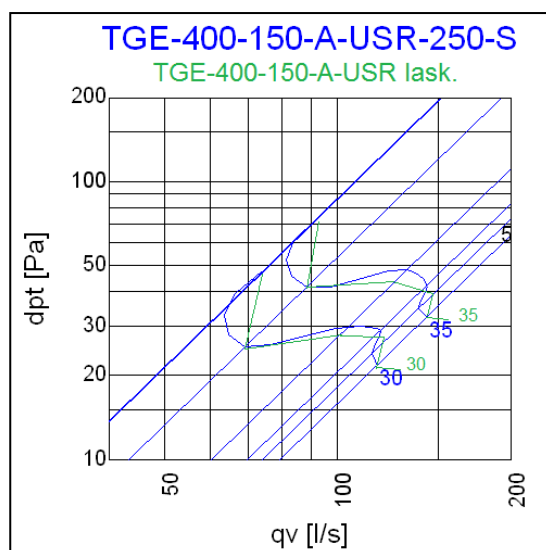
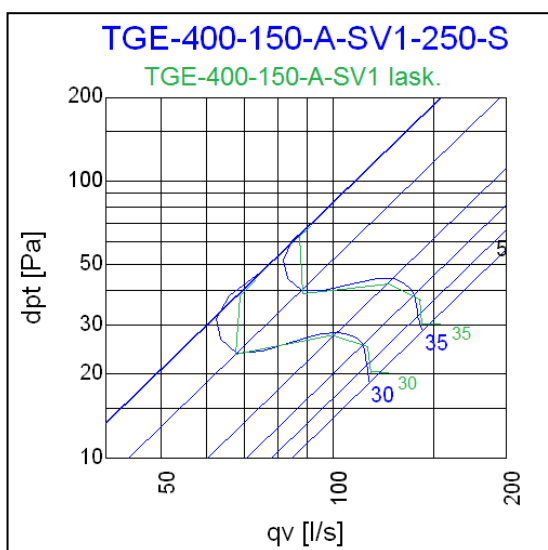
## Äänenkehityksen laskentamallin tulokset



## Äänenkehityksen laskentamallin tulokset

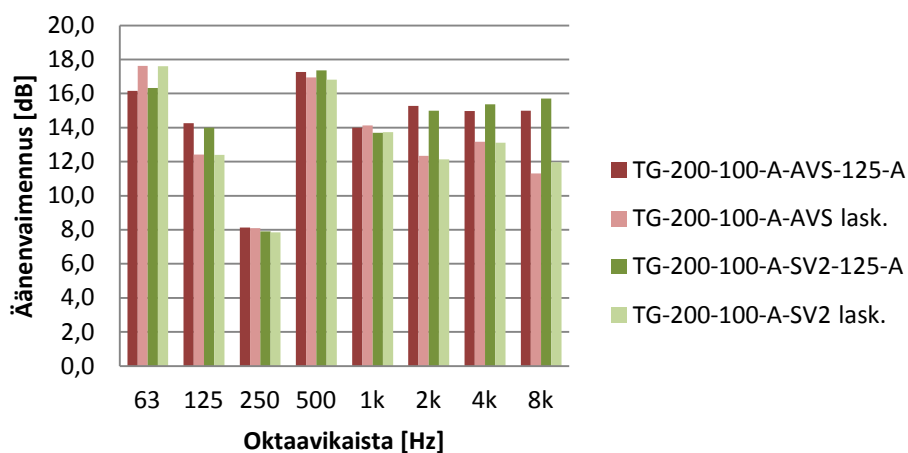


## Äänenkehityksen laskentamallin tulokset

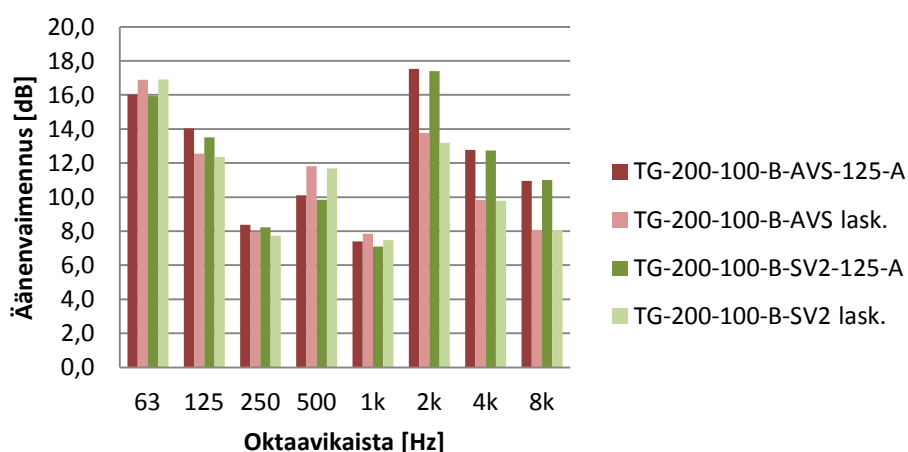


## Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset

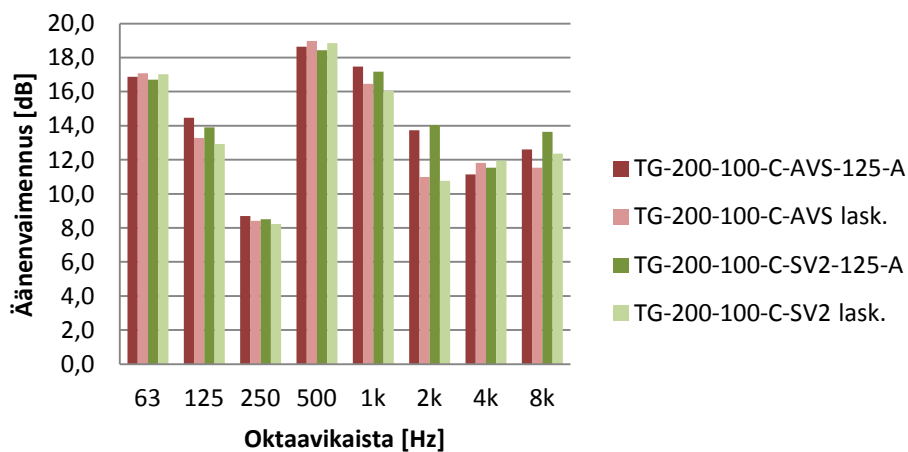
## Äänenvaimennuksen laskentamalli



## Äänenvaimennuksen laskentamalli

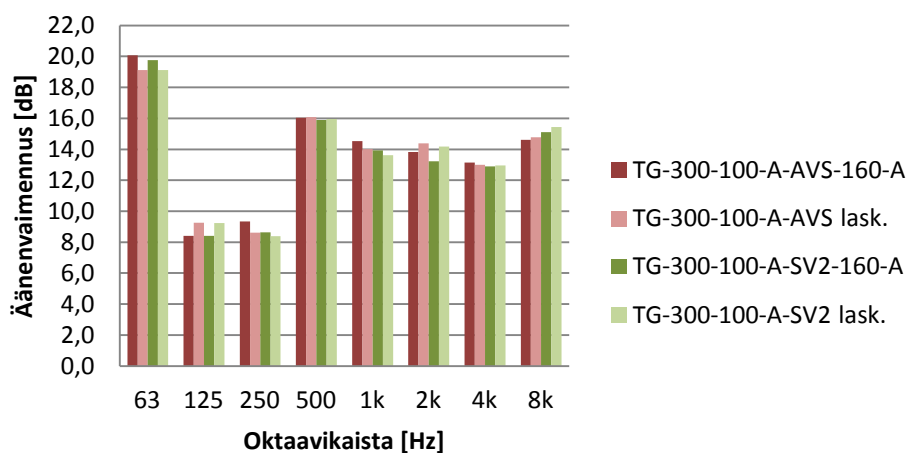


## Äänenvaimennuksen laskentamalli

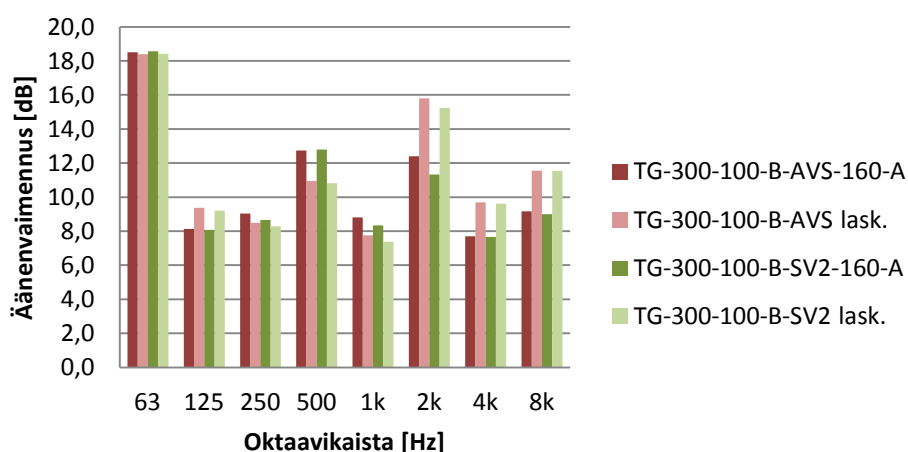


## Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset

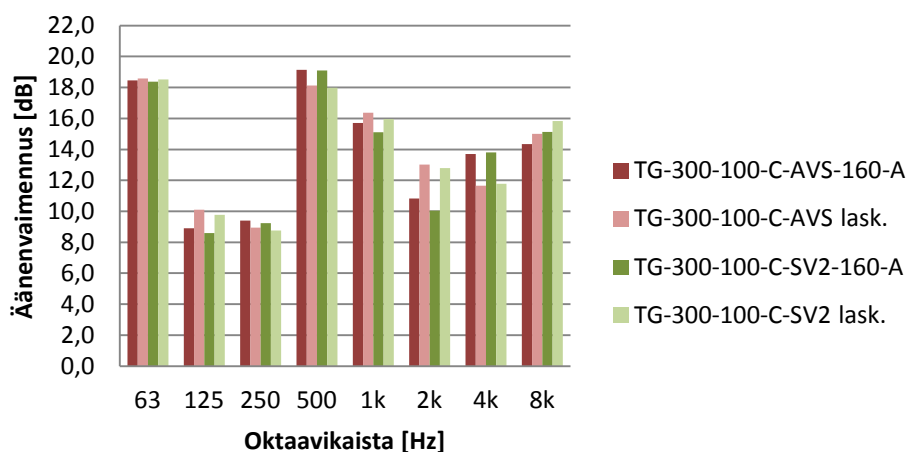
## Äänenvaimennuksen laskentamalli



## Äänenvaimennuksen laskentamalli

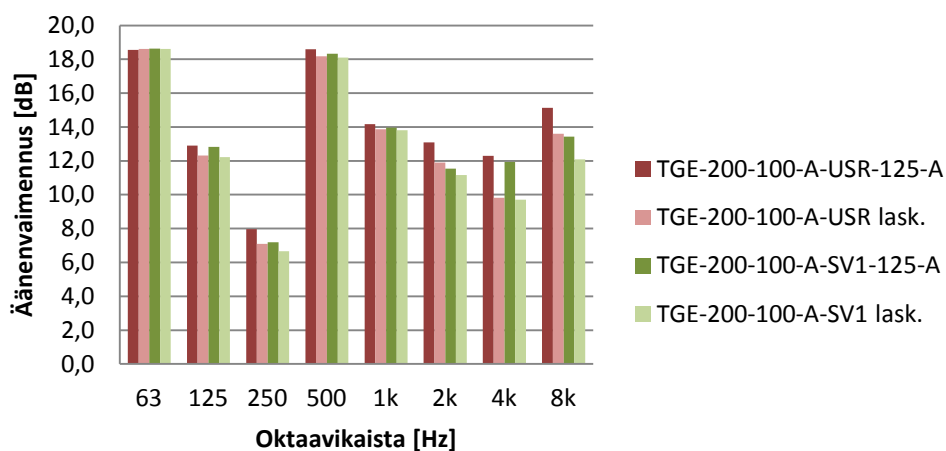


## Äänenvaimennuksen laskentamalli

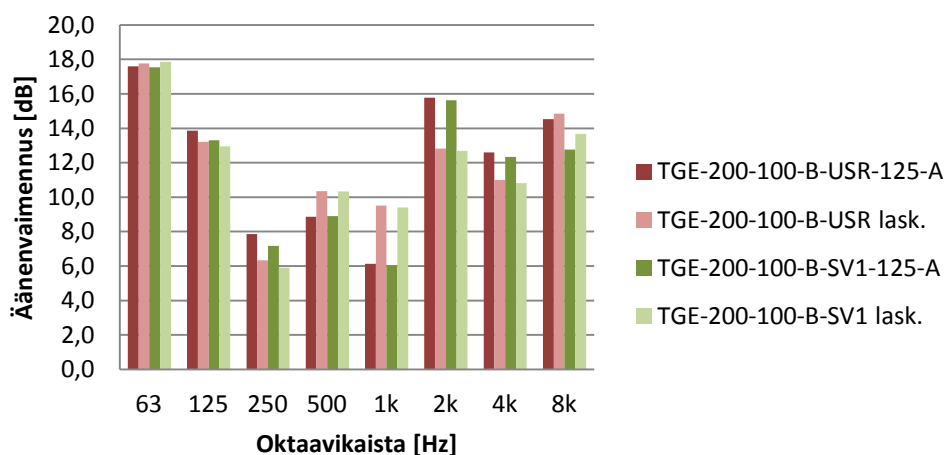


## Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset

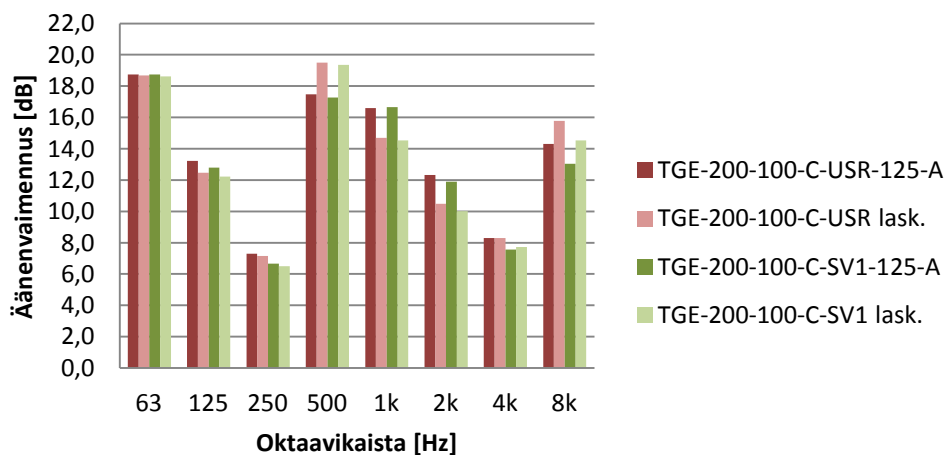
## Äänenvaimennuksen laskentamalli



## Äänenvaimennuksen laskentamalli



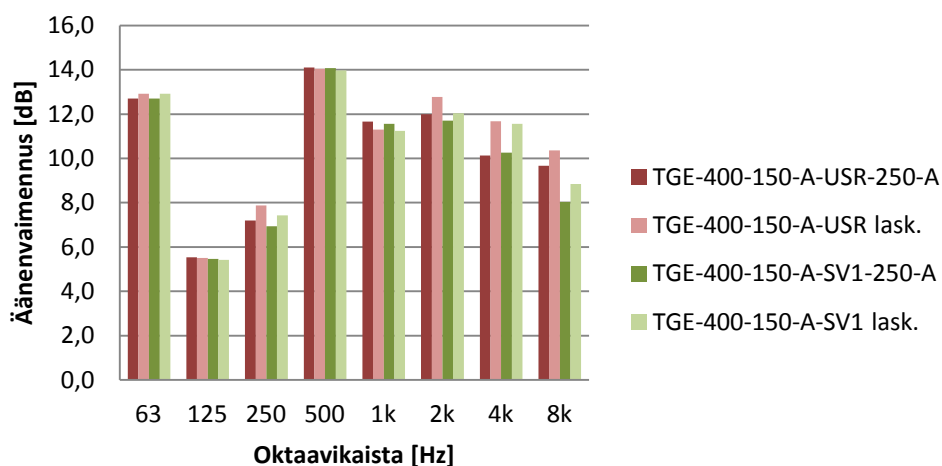
## Äänenvaimennuksen laskentamalli



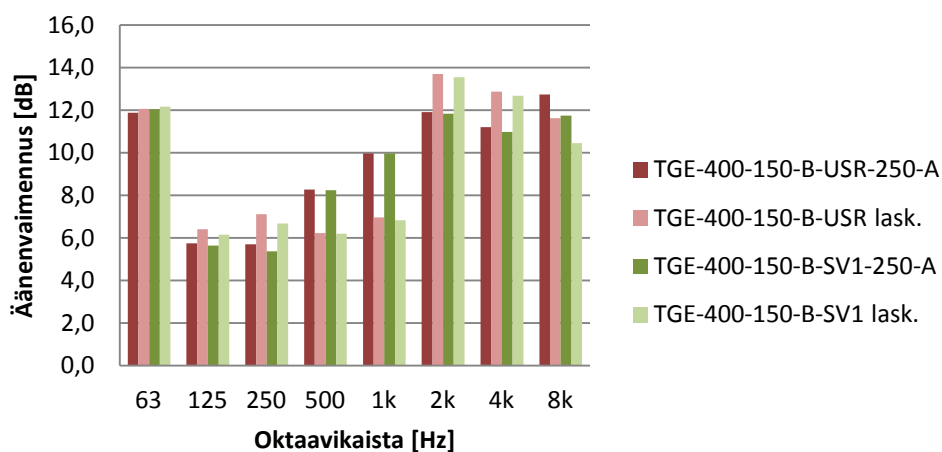


Äänenvaimennuksen laskentamallin tulokset

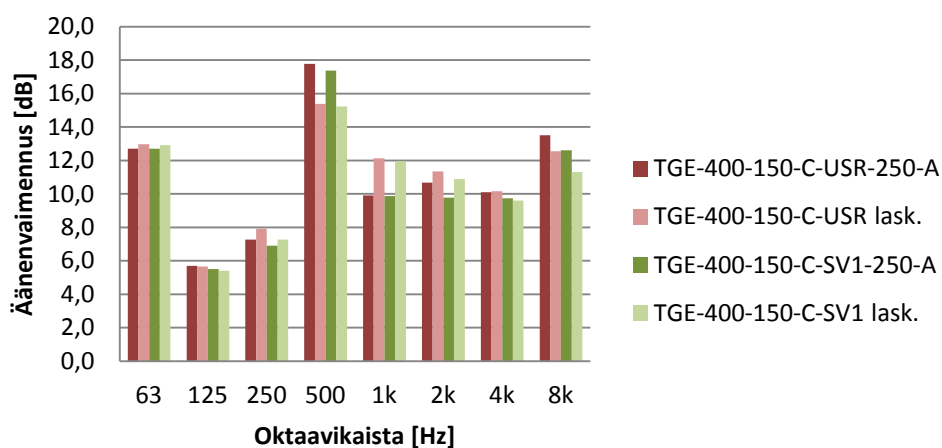
### Äänenvaimennuksen laskentamalli



### Äänenvaimennuksen laskentamalli



### Äänenvaimennuksen laskentamalli



Äänenkehitys:

	A-AVS	A-SV2	A-SV1	A-USR
Säätöasento	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>
0	0,7	0,7	0,0	1,50
0,2	-0,6	0,2	0,2	1,33
0,5	0,4	0,3	2,7	4,08
1	1,2	1,2	0,9	1,67
2	2,3	1,3	0,8	1,33
3	2,1	1,3	0,8	1,75
4	2,1	1,3	1,3	1,67
5	1,625	0,875	2,4	2,60

	B-AVS	B-SV2	B-SV1	B-USR	TG-B	TGE-B
Säätöasento	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>liit</sub>	K <sub>liit</sub>
0	1,3	0,4	0,2	0,5	-1,5	4,8
0,2	1,4	0,6	0,2	0,5	0	6,5
0,5	0,9	0,9	-0,5	-0,5	8	6,3
1	0,9	0,5	-1,0	-1,5	7	-2,3
2	1,1	0,0	1,0	2,0	9,5	-0,8
3	0,0	-0,1	0,8	1,7	6,5	2,8
4	0,1	-0,5	0,8	1,3	5,5	3,8
5	0,0	-0,7	-0,3	0,5	4	6,0

	TG-B + B-AVS	TG-B + B-SV2	TGE-B + B-SV1	TGE-B + B-USR
Säätöasento	K	K	K	K
0	-0,3	-1,1	4,9	5,3
0,2	1,4	0,6	6,7	7,0
0,5	8,9	8,9	5,8	5,8
1	7,9	7,5	-3,3	-3,8
2	10,6	9,5	0,3	1,3
3	6,5	6,4	3,6	4,4
4	5,6	5,0	4,6	5,1
5	4,0	3,3	5,8	6,5

	C-AVS	C-SV2	C-SV1	C-USR	TG-C	TGE-C
Säätöasento	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>liit</sub>	K <sub>liit</sub>
0	1,3	1,2	2,6	2,9	-3,5	4,0
0,2	1,3	1,0	0,9	1,0	-3,5	6,5
0,5	2,2	1,0	0,0	-0,1	1,5	2,0
1	2,3	1,2	1,1	0,9	3,3	0,5
2	1,0	0,7	0,8	1,9	3,5	1,0
3	2,3	1,2	0,5	1,6	1,0	2,0
4	4,3	2,7	-0,5	0,5	1,0	3,0
5	3,5	2,5	-0,8	0,5	0,0	5,0

	TG-C + C-AVS	TG-C + C-SV2	TGE-C + C-SV1	TGE-C + C-USR
Säätöasento	K	K	K	K
0	-2,2	-2,3	6,6	6,9
0,2	-2,2	-2,5	7,4	7,5
0,5	3,7	2,5	2,0	1,9
1	5,6	4,4	1,6	1,4
2	4,5	4,2	1,8	2,9
3	3,3	2,2	2,5	3,6
4	5,3	3,7	2,5	3,5
5	3,5	2,5	4,2	5,5

Äänenvaimennus:

	A-AVS	A-SV2	A-SV1	A-USR
Oktaavikaista	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>
63	-0,3	-0,4	-0,1	-0,1
125	0,6	0,6	0,3	0,2
250	1,3	1,0	1,5	1,1
500	0,7	0,6	0,6	0,6
1k	0,4	0,0	-0,1	-0,2
2k	1,8	1,6	1,6	0,9
4k	1,5	1,5	1,7	1,6
8k	2,4	3,0	3,3	1,8

	B-AVS	B-SV2	B-SV1	B-USR	TG-B	TGE-B
Oktaavikaista	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>liit</sub>	K <sub>liit</sub>
63	-0,5	-0,4	0,1	0,0	-0,6	-1,0
125	0,3	0,1	0,6	0,8	0,5	0,4
250	1,3	1,1	1,1	1,5	-0,2	-0,8
500	0,8	0,7	0,5	0,6	-5,3	-7,7
1k	0,5	0,2	0,4	0,5	-6,5	-5,0
2k	1,7	1,1	2,2	2,4	1,6	0,2
4k	1,1	1,0	0,9	1,1	-2,9	1,8
8k	1,2	1,2	1,5	2,6	-2,1	2,0

	TG-B + B-AVS	TG-B + B-SV2	TGE-B + B-SV1	TGE-B + B-USR
Oktaavikaista	K	K	K	K
63	-1,1	-1,1	-0,9	-1,0
125	0,7	0,6	1,0	1,2
250	1,1	0,9	0,3	0,7
500	-4,5	-4,6	-7,2	-7,2
1k	-5,9	-6,3	-4,6	-4,5
2k	3,3	2,7	2,4	2,6
4k	-1,8	-1,9	2,7	2,9
8k	-0,8	-0,9	3,4	4,6

	C-AVS	C-SV2	C-SV1	C-USR	TG-C	TGE-C
Oktaavikaista	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>säl</sub>	K <sub>liit</sub>	K <sub>liit</sub>
63	-0,8	-0,8	0,0	0,1	-0,1	-0,2
125	0,6	0,3	0,2	0,5	0,9	0,0
250	1,8	1,6	1,1	1,8	-0,2	-0,2
500	0,6	0,5	0,6	0,8	2,1	1,2
1k	0,8	0,4	-0,3	-0,2	1,9	0,9
2k	2,1	1,9	1,2	1,7	-1,6	-1,4
4k	2,1	2,2	0,7	1,2	-2,0	-1,0
8k	1,8	2,6	2,4	3,6	0,8	1,9

	TG-C + C-AVS	TG-C + C-SV2	TGE-C + C-SV1	TGE-C + C-USR
Oktaavikaista	K	K	K	K
63	-0,9	-0,9	-0,1	-0,1
125	1,5	1,1	0,2	0,5
250	1,6	1,4	0,9	1,6
500	2,7	2,6	1,8	2,0
1k	2,7	2,3	0,5	0,7
2k	0,5	0,3	-0,3	0,2
4k	0,1	0,3	-0,3	0,2
8k	2,6	3,4	4,3	5,5